«أفضل كتاب يعطي نظرة عامة ويحكي واقع صناعة الطاقة الشمسية الذي تشهده اليوم،
وخريطة طريق لكيفية الوصول إلى مستقبل أكثر إشراقًا».
-الفايناتشيال تايمز

ترويض الشمس

ابتكارات لتسخير الطاقة الشمسية و إمداد الكوكب بالطاقة

فارون سيفارام

نقله إلى العربية
د. عادل محمد العَمَري

راجعه
د. داود سليمان القرنة





Innovations to Harness Solar Energy and Power the Planet Authors:Original Title:Taming the Sun: Varun Sivaram

ISBN-10 :0262037686:ISBN-13: 978-0262037686

شركة العبيكان للتعليم، 1442هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر سيفارام؛ فارون

ترويض الشمس./ فارون سيفارام؛ عادل محمد العمري. -الرياض، 1442هـ

ردمك: ٩٧٨-٦٠٣-٥٠٩-٤٠٩-٢

١- الطاقة الشمسية ٢- مصادر الطاقة

أ. العمري، عادل محمد (مترجم) ب. العنوان ديوي ٦٢١,٤٧ ١٤٤٢/١١١٨٧

الطبعة الأولى
١٤٤٣هـ/٢٠٢٢م

نشر وتوزيع العبيكان Obeikan

المملكة العربية السعودية – الرياض طريق الملك فهد - مقابل برج المملكة
هاتف: ٤٨٠٨٦٥٤ ١١ ٩٦٦+، فاكس: ٤٨٠٨٠٩٥ ١١ ٩٦٦+:ص.ب: ٦٧٦٢٢ الرياض ١١٥١٧

الإهداء إلى أمي؛ أنت مصدر الطاقة التي تجعلني أواصل السير

مقدّمة

التقيت بعمدة مدينة لوس أنجلوس؛ أنطونيو فيلارايجوسا Antonio Villaraigosa عام 2012م في حفل استقبال في العاصمة واشنطن. كنت في ذلك الوقت طالب دكتوراه في جامعة أكسفورد، أعمل على تطوير موادّ جديدة لتوليد مزيد من الكهرباء بكلفة أقلّ من الألواح الشمسية الكهروضوئية solar photovoltaic (PV) التقليدية. شاركت بحثي مع العمدة، فأعطاني رقم هاتفه الخلوي وطلب إليّ الاتصال به؛ فاعتقدت أنه تصرّف معي بلباقة فقط؛ لذلك عدت إلى أكسفورد، وانشغلت في إنهاء رسالتي، لكنني تلقيت رسالة بالبريد الإلكتروني بعد بضعة أيام من نائب العمدة؛ يسألني عمّا إذا كنت أرغب في العمل مستشارًا أول للعمدة، وإذا كان يمكنني، في حال موافقتي، الاتصال بالعمدة في اليوم التالي لمناقشة طبيعة العمل؛ فانتقلت إلى لوس أنجلوس في غضون أسبوع.

وصلت إلى هناك ولم أكن مستعدًّا بما يكفي، لكني كنت شديد الثقة بنفسي. لم يسبق لي أن ركّبت لوحةً شمسية واحدة، ومع ذلك، كان لدى العمدة فيلارايجوسا تصور بخصوص نشر استخدام الطاقة الشمسية في لوس أنجلوس على نطاق واسع أكثر من أيّ مدينة أخرى في البلاد. ظننت في تلك اللحظة أنّ معرفتي الجيدة بأحدث التطوّرات في المختبرات العلمية حول العالم تمكّنني من تحقيق تصوّر رئيس البلدية، من خلال استخدام تقنيات جديدة للطاقة الشمسية تتفوّق على الألواح الشمسية الجاهزة المنتشرة في المدن الأخرى. لكن سرعان ما اكتشفت أنّ تفكيري كان محدودًا؛ فبعد مدّة وجيزة من بدء العمل في مكتب رئيس البلدية، خطرت لي فكرة رائعة، وهي مصاحبة المساح في إحدى جولاته حول المدينة بالطائرة المروحية؛ فقد كانت وزارة المياه والطاقة ترسله أحد المساحين مرات عدّة في الأسبوع؛ من أجل مسح القناة الساحرة التي تجعل من لوس أنجلوس واحة استثنائية في وسط الصحراء. كان على الجانب الغربي من صحراء موهافي وبمحاذاة مسار الدوريات الجوّية مشروع طاقة شمسية أُنشئ مؤخّرًا ويستخدم الألواح الشمسية التقليدية؛ لذا كانت المروحية وسيلة رائعة لإلقاء نظرة عليه.

عندما اقتربنا من المزرعة الشمسية، رأيت ألواحًا شمسية منتشرة في كلّ اتجاه على مدّ البصر، وذلك على امتداد مساحة تعادل ألفي كرة قدم، وكلها مائلة نحو الجنوب لتغمرها أشعّة شمس الصيف، ومن حسن الطالع أن استجاب الطيار لطلبي بالطيران قريبًا من الأرض، فتمكّنت من رؤية التفاصيل على كلّ لوحة، وحتى كلّ خلية سيليكون. بدت الخلايا وكأنّها قطع من البسكويت بحجم الكف ومرقطة باللونين الأزرق والأسود. كانت هذه الخلايا تستطيع تحويل ما يقارب من 20 بالمئة من أشعّة الشمس إلى كهرباء. إنّ ربط هذه الوحدات المتعدّدة معًا- عن طريق توصيل الخلايا

ببعضها في اللوحات، ومن ثم توصيل الألواح ببعضها أيضًا في مزرعة شمسية ضخمة- يجعل من الممكن توليد مزيد من الطاقة التي كانت محدودة بسبب مساحة الأرض المتاحة.

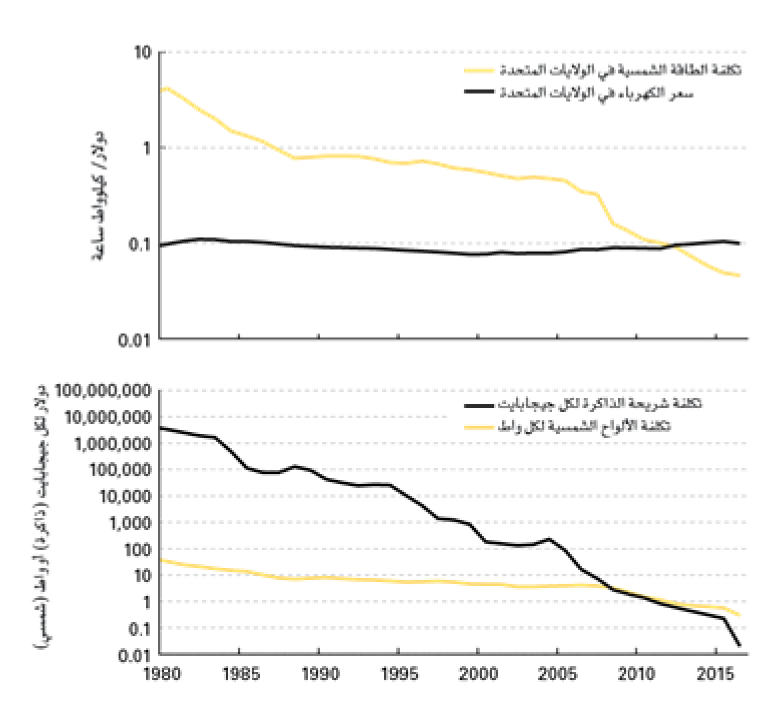
عرفت في تلك الرحلة أشياء كثيرة عن استخدام الطاقة الشمسية؛ فقد شيّدتُ من قبل خلايا شمسية بحجم ظفر الإصبع في برجي العاجي التأملي (أقمته في واقع الأمر في مختبر عند قبو من الحجر الجيري) عندما كنت طالبًا في جامعة أكسفورد. إنّ مشاهدة الطاقة الشمسية "في البريّة" جعلتني أرى أنّ المدينة غير مستعدّة لنشر خلايا شمسية مخترعة حديثًا على الفور، وعلى النطاق المطلوب لتحقيق رؤية العمدة، وستكون الحاجة ماسّة إلى مليارات الدولارات لتغطية ميل مربع واحد من الصحراء بهذه الخلايا.

بقيادة العمدة فيلارايجوسا ستقود لوس أنجلوس البلاد في نهاية المطاف إلى نشر الطاقة الشمسية 1، وقد فعلنا ذلك باستخدام تقنية مجرّبة وحقيقية؛ ذلك أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون استُخدمت لعقود، ويمكن أن ينتجها الصينيون في الوقت الراهن بشكل كبير. وباستخدام هذه الألواح استطعنا خفض خطر أن كلفة تركيبها قد تكون أعلى مما هو متوقّع، أو أنها ربما تتوقف عن العمل. سعى العمدة جاهدًا لاستخدام المزيد من الطاقة الشمسية التي تُعدّ مصدرًا متأرجحًا وغير منتظم للكهرباء؛ لأنها تعمل فقط عندما تكون الشمس مشرقة، ومما زاد في صعوبة الأمر أنّه كان عليه تغطية حاجة أربعة ملايين مواطن في لوس أنجلوس من الكهرباء والمحافظة على استمراريتها؛ لذلك سعينا جاهدين لتفادي أيّ مخاطر إضافية أخرى متعلّقة باستخدام تقنيات الطاقة الشمسية غير الموثوقة عمليًّا.

تعلّمت وفقًا لتلك التجربة أنّ منظورًا واحدًا لا يكفي لإدراك قدرات الطاقة الشمسية الهائلة (فالطاقة التي ترسلها الشمس إلى الأرض في ساعة واحدة أكثر من تلك التي يستهلكها العالم في سنة كاملة). على سبيل المثال، قال لي رون نيكولز Ron Nichols (الرئيس التنفيذي والعقل المُدبِّر في شركة كهرباء المدينة) إنّ إضافة الطاقة المتجدّدة إلى شبكة الكهرباء القائمة يشبه "إصلاح محرّك طائرة 747 في منتصف رحلة طيرانها"؛ فآخر شيء تريد إجراءه هو إضافة جزء متحرّك آخر لتجربة تقنية جديدة. لكنّ زملائي في الأوساط الأكاديمية أظهروا لي أنّ تقنيات الطاقة الشمسية التي تُعدّ أفضل بكثير من التقنيات المستخدمة اليوم موجودة بالفعل في المختبر، ومن المرجّح أنّها ستتمكّن يومًا ما من تسخير طاقة الشمس بشكل أكثر كفاية وأقلّ تكلفة إذا تمّ صقلها وتنقيحها وإنتاجها بكمّيات كبيرة.

في الحقيقة أن منظورنا لوضع ما يتشكل بحسب رؤيتنا، خاصة عندما يتعلق الأمر بشأن تقييم تطوّر تقنية الطاقة الشمسية،؛ حيث يرى مراقبو قطاع الطاقة أنّ نسبة انخفاض تكلفة الألواح الشمسية التقليدية أمر مذهل، ويُشكّل ثورة في الوقت نفسه. يوضّح الجزء العلوي في الشكل (0.1) التكلفة

المناسبة والمنخفضة للطاقة الشمسية في الولايات المتحدة، مقارنة بمتوسّط تكلفة الكهرباء الذي ظلّ ثابتًا لعقود.



الشكل (0.1): انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية في بيئات مختلفة. يقارن الرسم البياني العلوي تكلفة كيلوواط / ساعة للكهرباء الناتجة من الألواح الشمسية المشيدة في الولايات المتحدة مع متوسط تكلفة الكهرباء للمنازل الأمريكية.(ينبغي أن يؤخذ في الحسبان حساب تكلفة الطاقة الشمسية وفقًا لتكلفة الألواح الشمسية، بالإضافة إلى التكاليف الأخرى؛ مثل تلك الخاصّة بالمعدّات والأراضي والعمالة والتمويل). أما الرسم البياني السفلي فيقارن تكلفة الألواح الشمسية لكلّ واط من سعة توليد الطاقة بتكلفة رقائق الذاكرة لكلّ جيجابايت من سعة تخزين البيانات.

المصدر: U.S. Energy Information Administration, IC Knowledge.

لكن خبراء التقنية يرون أنّ انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية يبقى أمرًا عاديًا؛ فبدلًا من مقارنة تكلفة الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية مع تلك الخاصّة بالوقود الأحفوري، فقد يقارنون تكلفة واط واحد من الطاقة الشمسية المنتجة بتكلفة تحقيق مقياس أداء مماثل في رقاقة الكترونية صغيرة مثل الجيغابايت الخاصّة بتخزين الذاكرة. وفي الحقيقة أن هذه المقارنة الموضحة في الجزء السفلي من الشكل (0.1) غير مقنعة لأن تكاليف الرقائق الالكترونية الصغيرة قد انخفضت بشكل أسرع ملايين المرات مقارنة بتكلفة الألواح الشمسية. ويُعدّ هذا التراجع السريع نتيجة طبيعية لقانون مور. (قانون مور Moore's Law -حسب بعض التقارير- لم يعد فاعلًا بشأن الرقاقات الحاسوبية المعروفة باسم المعالجات المصغّرة، لكنّه لا يزال مستخدمًا بصورة جيدة بخصوص شرائح الذاكرة، وكما علمت من والدي الذي يعمل رئيسًا لإحدى الشركات الكبرى المصنّعة للشرائح الإلكترونية- فقد

كشف مؤخّرًا عن تصميم لشريحة ذاكرة محمولة (وامضة) جديدة ومتفوّقة فعليّا على قانون مور، بل وموجودة بالفعل على جهاز الآيفون الخاص بك)(*).

ولإدراك قيمة وجهات النظر المختلفة، سعيت بشغف على مدى العقد الماضي لتعلّم المزيد، وبالإضافة إلى الوقت الذي قضيته في الأوساط الأكاديمية وفي لوس أنجلوس، فقد عملت في شركتين ناشئتين في وادي السيليكون، ومستشارًا في بعض كبريات الشركات العاملة في مجال الطاقة، وقدّمت المشورة للمسؤولين الفيدراليين ومسؤولي الولايات المتحدة، وزرت أسواق الطاقة الشمسية المزدهرة في كل أنحاء العالم.

وجدت في أثناء ذلك كثيرًا من التناقضات؛ فالعلماء يشعرون باليأس من ركود تقنية الطاقة الشمسية على الرغم من استمرار التقدم الصناعي في هذا المجال. كذلك فإنّ بعض العلماء يتوقّعون أنّ الألواح الشمسية وتوربينات الرياح يمكن أن تتضاعف حتى ينفد العالم من الطاقة النظيفة بنسبة 100٪، بينما يرفض آخرون هذه الفكرة ويصفونها بالغبية. أضف إلى ذلك أنّ العديد من صانعو السياسات من المؤيدين يدعمون بشدّة الحوافز والتعليمات المتعلقة بتركيب المزيد من وحدات توليد الطاقة الشمسية، في حين أنّ العديد من المعارضين يرفضون هذه السياسات إهدارًا للموارد.

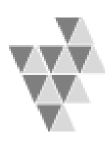
من الممكن أن تكون هذه الحزمة من التناقضات مربكةً، لكنّ التفكير بإنعام في الجوانب الصحيحة والخاطئة لكلّ منظور ساعدني في فهم وجهات النظر المختلفة كلّها؛ لقد ألّفت هذا الكتاب لتقديم وجهة نظر منصفة وحيادية حول مستقبل الطاقة الشمسية، تأخذ في الحسبان مزيجًا متنوّعًا لوجهات النظر القيّمة التي تغطي مجالات الأعمال والعلوم والسياسة العامة.

في هذا الكتاب أخذت في الحسبان شريحة كبيرة من القرّاء، تشمل أيّ شخص مهتمّ بمستقبل الطاقة الشمسية، والطلاب الذين يستكشفون الطاقة واستدامتها، والعلماء الذين يرغبون في فهم الجوانب المالية لتسويق تقنياتهم الجديدة، والمديرين التنفيذيين والمستثمرين الذين يتطلّعون إلى فهم أهمّ التوجّهات التقنية القادمة، وصانعي السياسات في جميع أنحاء العالم الذين يحتاجون إلى إدراك نوعية التدخلات الأكثر ملاءمة.

أزعم في الفصول التالية أنّ سوق الطاقة الشمسية المتوهج حاليًا يمكن أن يخبو مستقبلًا ما لم تستثمر دول العالم، أجمع، بصورة عاجلة، في الابتكار في هذا المجال. وعليه، فقد قسمت الكتاب إلى أربعة أجزاء، يبدأ كلّ جزء بملخّص، مقسم إلى نقاط، للفصلين أو الثلاثة فصول التي يتألف منها الجزء ذو الصلة؛ لتساعدك هذه الملخّصات في العثور على الفصل الذي تريد وفقًا لاهتمامك؛ كالآتي: على الرغم من تمتعّ الألواح الشمسية الحالية بتكلفة تنافسية، وذلك باعتبارها مصدرًا مهمًا للطاقة، إلا أن اقتصاداتها قد تبدو أقلّ جاذبية بكثير في حالة التوسع في نشر هذه الألواح (الجزء الأول). سيتطلّب دعم الصعود المستمر للطاقة الشمسية ثلاثة أنواع من الابتكار: الابتكار المالي لتوظيف مستويات هائلة من الاستثمار من أجل التوسّع في الطاقة الشمسية (الجزء الثاني)؛ الابتكارات التقنية اللازمة

لتسخير طاقة الشمس بتكلفة أقلّ وتخزينها واستخدامها على مدار الساعة (الجزء الثالث)؛ والابتكار المنهجي لإعادة تصميم أنظمة مثل شبكة الطاقة للتعامل مع الزيادات والانخفاضات في الطاقة الشمسية (الجزء الرابع).

الشمس هي مصدر الطاقة الأكثر وفرة على الأرض، وأعتقد أنّ الأمل الأمثل لمواجهة التغيّر المناخي على كوكب الأرض هو أن تستخدم البشرية الطاقة الشمسية في تلبية معظم حاجاتها من الطاقة في وقت ما من هذا القرن. لكننا لن نضمن أن ترتقي الطاقة الشمسية إلى مستوى هذا الوعد الاستثنائي إلا من خلال حشد الرؤى المستبصرة من منظورات متعددة.



الجزء الأول ممارسة اللعبة الطويلة

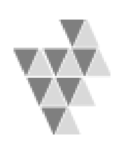
المحاور الرئيسة

● من الممكن أن تشهد مدن العالم في عام 2050م تلوّثًا خانقًا، وقد يتعرّض الكوكب لتغيّر مناخي كارثي؛ أو قد نرى -على النقيض من ذلك- عالمًا مستعدًّا لمواجهة مجموعة من التحدّيات العالمية. يصف الفصل الأول (المستقبل على وجهين) بأنّ المحدّد الرئيس الذي سيرسم المستقبل هو مدى قدرة البشرية على تسخير الطاقة الشمسية؛ فإما أن نصل إلى مستقبل يتعثّر فيه صعود الطاقة الشمسية، وهذا لن يُعدّ سابقة؛ فلقد حدث مثل ذلك من قبل حين كانت الطاقة النووية تُعدّ ذات يوم الأمل العظيم للحصول على طاقة رخيصة ونظيفة ومتوافرة للجميع، وحين بلغت حصّتها من الطاقة العالمية ذروتها في التسعينيات من القرن الماضي، لكنّها سرعان ما تراجعت وبشكل مطّرد منذ ذلك الحين. والعالم اليوم ليس قادرًا على تحمّل حدوث مثل ذلك للطاقة الشمسية، ولسوء الطالع، فإنّ البلدان التي لا تستثمر بشكل استباقي في ابتكار الطاقة الشمسية، ستُدرك المستقبل الثاني.

● يحتفلون اليوم بدلًا من ذلك بالألواح الشمسية الرخيصة؛ الفصل الثاني (نضوج الطاقة الشمسية)، يوثّق نضوج الطاقة الشمسية خلال العقد الماضي، متوّجًا ثلاثة آلاف عام من الجهد البشري في تسخير طاقة الشمس، حيث تصدّرت الصين بعد منافسة شديدة بين الدول على تطوير تقنية الطاقة الشمسية، بوصفها أكبر دولة مُنتِجة ومُستهلِكة لصناعة الطاقة الشمسية؛ ذلك أن تقنية السيليكون الخاصّة بالطاقة الكهروضوئية والمُصنّعة في الصين تُعدّ الأرخص والأسرع نموًّا على وجه الأرض.

● ومع ذلك، فإن التنافس على استحواذ تقنية الطاقة الشمسية لا يضمن النجاح؛ فالطريقة الأكثر منطقية للحدّ من تغيّر المناخ الكارثي هي أن توفّر الطاقة الشمسية ما لا يقلّ عن ثلث الحاجة العالمية للكهرباء بحلول منتصف القرن الحالي، عوضًا عمّا توفّره اليوم (2٪)، ثم تسعى لتوفير المزيد بعد ذلك. وعليه، سيتعين على الطاقة الشمسية -لكي يتحقّق ذلك- أن تتغلّب على أكبر التحدّيات في أثناء نموّها. الفصل الثالث، (حجب الشمس)، ينوّه إلى التحدّيات الاقتصادية التي تقوّض فاعلية الطاقة الشمسية والتي قد تزيد من الضغط على شبكات الطاقة، مما يعيقها من أن تكون بديلًا للوقود الأحفوري.

سوف يتطلب الأمر ابتكارًا في نماذج التمويل والأعمال، وتقنيات الطاقة الشمسية، وأنظمة الطاقة الشمسية؛ لتفادي الاصطدام بهذه التحدّيات، والاستفادة من كامل قدراتها بدلًا من ذلك.



الفصل الأول مستقبل بوجهين

لنتخيل أننا الآن في العام 2050م، وقد أصبح العالم فيه أكثر تلوّثا وخطورةً وانعدامًا للمساواة من أيّ وقت مضى؛ الضباب الدخاني يخنق المدن الكبرى؛ مثل نيودلهي ومكسيكو سيتي ولاغوس، حيث لا يزال أكثر من مليار شخص حول العالم لا يملكون مصدرًا للكهرباء يمكن الاعتماد عليه، ويؤدّي تغيّر المناخ إلى حدوث موجات الجفاف والفيضانات وارتفاع درجات الحرارة بشكل دائم ومقلق.

أما السبب في ذلك فهو أنّ الوقود الأحفوري يفرض هيمنته على الاقتصاد العالمي؛ فلا يزال الفحم والغاز الطبيعي يحرقان لإنتاج معظم الكهرباء في العالم وتشغيل معظم المصانع، مما يؤدّي إلى انبعاث ثاني أكسيد الكربون والغازات الأخرى المُسبّبة للاحتباس الحراري في الغلاف الجوي، وعلاوة على ذلك ما زالت غالبية السيارات والشاحنات وكذلك الطائرات والسفن كلّها في هذا الكوكب تعتمد على النفط في حركتها، مما يؤدّي إلى زيادة تلوّث الهواء.

هذه الحالات الكارثية في العالم هي نتيجة البطء في تطوير الطاقة الشمسية. وبالعودة إلى عام 2016م، فقد صارت الألواح الشمسية الكهروضوئية التي تحوّل ضوء الشمس إلى كهرباء، أرخص مصادر الكهرباء على هذا الكوكب1. حيث يتنبّأ الخبراء بلهفة بأنّ الوقت الذي تُزيل فيه الطاقة الشمسية الكهروضوئية الوقود الأحفوري قد أوشك على القدوم، وهذا إدّعاء جريء لتقنية لا تزال توّفر أقلّ من 1 بالمئة من حاجات الطاقة في العالم.

يمكن لوهلة تبرير تلك الأحلام الوردية؛ فعلى مدار العقدين المقبلين سترتفع شعبية الطاقة الشمسية الكهروضوئية؛ ذلك أنّ المنازل الجديدة تُبنى في البلدان المتقدّمة بأسقف شمسية رائعة، وفي أكثر مناطق العالم النامي فقرًا، أمدّت أنظمة الطاقة الشمسية المستقلّة ملايين القرويين الذين لا تصلهم شبكة الكهرباء بالطاقة الحديثة لأول مرة. من تشيلي إلى الصين، انتشر كثير من مزارع الطاقة الشمسية -أي حقول شاسعة من الألواح الكهروضوئية- لتصبح مصدرًا للطاقة أكثر من أنواع محطات الطاقة الأخرى مجتمعة، ونظرًا إلى أنّ معظم المنتجين في آسيا أنتجوا الألواح المصنوعة من السيليكون عامًا بعد عام، فقد صار بمقدورهم خفض تكاليف هذه التقنية.

قد يحدث تباطؤ في نموّ الطاقة الشمسية الجامح في وقت ما في العقد الثالث من القرن الحالي، ما سيجعلها بعيدًا إلى حد كبير عن أن تحل محل أنواع الوقود الأحفوري، حيث ستكون الأسواق حول العالم قد تشبعت مع تراجع الطلب على وحدات إضافية لتوليد الطاقة الشمسية، ومن ثم حصولها على مركز تنافسي متقدم مقارنة مع الوقود الأحفوري. فلماذا يحدث تباطؤ في انتشارها إذًا؟

يعود جزء من المشكلة إلى أنه على الرغم من انخفاض تكلفة إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية، إلا أن قيمة الكهرباء -أي القيمة التي كان مرفق الكهرباء، على سبي المثال، قابلًا لسدادها، مقابل الحصول على الكهرباء، ليرسلها بعد ذلك عبر الشبكة من أجل تلبية احتياجات المنازل والشركات- قد تراجعت بشكل أسرع. وذلك لأنّ أي مصدر للطاقة مرتبط بأشعة الشمس غير المنتظمة؛ يتحول إلى مصدر للإزعاج مع تنامي استخدامه، فالألواح الكهروضوئية تولّد الطاقة فقط عندما تستقبل ضوء الشمس، وبالتالي فإن حلول الظلام (أو حتى مرور أي سحابة عابرة) يمكن أن يعطّلها عن أداء وظيفتها. ولذلك كان الأمر معيقًا لنمو إنتاج الطاقة الكهروضوئية وتوسّعها. وقد تسبّب هذا التقطع حتى قبل عام 2020م في حدوث مشكلات في بعض المناطق التي كانت من أوائل المتبنّين للطاقة الشمسية؛ ففي ولاية كاليفورنيا -على سبيل المثال- لعبت الطاقة الشمسية الكهروضوئية دورًا بارزًا في تلبية معظم احتياجات الولاية من الطاقة خلال وقت الظهيرة حين تتوسط الشمس كبد السماء، ولكن بعد ذلك فإنّ إضافة لوحة شمسية جديدة مهما كانت رخيصة لا قيمة لها؛ لأن الولاية عندما كانت تحتاج إلى الطاقة في وقت العشاء، كانت الشمس تمضي نحو مغربها. ونتيجة لذلك، فقد كان من شأن الاضمحلال السريع في مقدار الطاقة المتولدة عن الألواح الشمسية، أنه تجاوز التراجع الخفيف في تكلفة تقنية الخلايا الشمسية الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون.

أدركت بعض البلدان -خاصة تلك التي كان لها السبق في نشر مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية- أنّ قيمة الطاقة الشمسية آخذة في الانخفاض، لكنها كانت على ثقة من أنّ بطاريات الليثيوم-أيون التي أصبحت رخيصة أيضًا إلى جانب الألواح الكهروضوئية، ستكون هي المنقذ؛ فانخفاض تكلفة هذه البطاريات جعل تخزين جزء الطاقة الشمسية غير المستخدمة في النهار واستخدامها في وقت لاحق من المساء ممكنًا فعلًا. ومع ذلك، لم تكن البطاريات كافية على عكس ما توقّعه الكثيرون؛ فمن الناحية الاقتصادية كان من المنطقي استخدامها لتخزين الطاقة لبضع ساعات؛ لكنها كانت باهظة التكلفة للغاية عند استخدامها لتقليل الفروقات اليومية في منتوجات الخلايا الشمسية الكهروضوئية، وبالتأكيد عند استخدامها لتلبية الحاجة الكبرى لتخزين الطاقة للأشهر التي يسود فيها الغيام.

لقد تباطأ كذلك نمو استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية لأن الدول، وبخاصة في العالم النامي، فشلت في بناء شبكات كهرباء لديها تكفي لمواكبة نظام استخدام الطاقة الشمسية؛ فقد عانت الهند -على سبيل المثال- من ربط مزارع الطاقة الشمسية في الصحاري البعيدة بالمدن الضخمة المتعطشة للكهرباء، وعندما حولت الحكومة تركيزها إلى نشر الألواح الشمسية على أسطح المباني، انهارت شبكات المدينة المتداعية تحت ضغط تحمل الاندفاع المفاجئ للطاقة الشمسية2.

صارت مساهمة الطاقة الشمسية في حاجات العالم إلى الطاقة يعتد بها بعد استقرارها في منتصف القرن، ولكنها لا تزال محدودة اليوم. وباستثناء الطاقة التي تنتجها الرياح، لم تسهم مصادر الطاقة

النظيفة الأخرى في تعويض النقص؛ حيث يعكس ارتفاع طاقة الرياح ارتفاع الطاقة الشمسية الكهروضوئية، وهما يُعدّان من مصادر الطاقة المتجدّدة وينتجان بشكل مشترك ثلث كهرباء العالم، ولكن طاقة الرياح -كما الطاقة الشمسية الكهروضوئية- لا يمكن الاعتماد عليها؛ لأنها تواجه أيضًا بعض القيود التي تحول دون انتشارها.

أصيبت مصادر الطاقة النظيفة الأكثر موثوقية بنكسة أيضًا؛ فبسبب الصراعات السياسية، تراجعت مفاعلات الطاقة النووية عن أيام مجدها في القرن العشرين، وتبقّى عدد قليل منها في آسيا اليوم، والسدود الجديدة للطاقة الكهرومائية لا تحظى بالقدر نفسه من الشعبية، ومختلف مصادر الطاقة النظيفة المحتملة الأخرى -من الطاقة الحرارية الأرضية إلى طاقة المدّ والجزر- لا تزال في الغالب على شكل رسومات هندسية. أما نتيجة ذلك فهي أنّ العالم لا يزال يعتمد على الوقود الأحفوري لتلبية معظم حاجاته من الكهرباء.

وعلى رأس هذه الأسباب هو أن العديد من حاجات الطاقة في العالم لا تعتمد على استخدام الكهرباء؛ إذ يتمّ تلبية هذه الحاجات بشكل حصري تقريبًا عن طريق الوقود الأحفوري حيث تنمو هذه الطاقة مواكبة لتحوّل الاقتصادات الصناعية الناشئة بالرغم من الأضرار الناتجة منها؛ فالمنشآت الصناعية، مثل مصانع الأسمنت والصلب، تحرق الفحم في صناعاتها فتنتج كمّيات كبيرة من الدخان نتيجة لذلك، والارتفاع الشديد لحركة النقل يؤدّي إلى تلوّث الهواء ويتسبّب في حدوث ازدحام شديد. وعلى الرغم من أنّ عدد الأشخاص الذين يمتلكون سيارات اليوم أقلّ مما كان عليه في العقود الماضية بسبب وجود المركبات ذاتية القيادة ووسائل النقل الجماعي المريحة، حيث جعلت هذه التطوّرات التنقل أسهل وأرخص من أيّ وقت مضى؛ إلّا أنّ الارتفاع المفاجئ في عدد الركاب أدّى إلى تكدّس المزيد من السيارات على الطرقات في أوقات الذروة3.

كان كثيرون من الناس يأملون في أن تقلّل السيارات الكهربائية من تلوّث الهواء المحلي، وقد ارتفعت بالفعل لتتصدّر مبيعات السيّارات الجديدة، لكنّ أكثر من مليار سيارة وشاحنة تعمل بالوقود البترولي لا تزال تشارك السيارات الكهربائية على الطرقات؛ فضلًا عن أنّ المركبات الكهربائية التي يُفترض أنها نظيفة تتسبّب في الواقع في تلوّث كبير في كلّ عملية شحن الكهرباء المنتجة من محطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري. وعليه، فإنّ ثلثا البشر يتنفّسون هواءً سامًا في تلك العواصم الملوّثة، بينما تحاول النخبة من مستقلي السيارات الكهربائية في العالم قطع المسافات في أقل وقت ممكن.

كل هذا سيئ بما فيه الكفاية، لكن العلماء يتوقّعون أنّ الأمر سيزداد سوءًا؛ لأن انبعاثات الكربون المتراكمة الناتجة من حرق جميع أنواع الوقود الأحفوري أحدثت تحوّلات مناخية لا رجعة فيها. ومن المضحك أنّ الدول في جميع أنحاء العالم وقّعت في عام 2015م اتفاقية باريس لتغيّر المناخ، والتزمت بكل جدية بالحدّ من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 2 درجة مئوية، لكنها خلال خمسة

عشر عامًا فقط ضخت من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي ما يكفي لرفع درجة الحرارة بدرجتين مئويتين على أقلّ تقدير4.

لقد نتجت عن التغيّر المناخي بالفعل خسائر في جميع أنحاء العالم؛ فقد أدّى ارتفاع مستوى سطح البحر إلى موجات الهجرة الجماعية من السهول الفيضية في بنغلاديش، وأدّت زيادة حموضة المحيطات إلى تدمير مصائد الأسماك من النرويج إلى نيكاراغوا، وتركت موجات الجفاف في جميع أنحاء أفريقيا والشرق الأوسط مئات الملايين في حالة مستمرة من المجاعة وندرة المياه، فشنّت مصر حملة ضد إثيوبيا بسبب تقليص إمداداتها من نهر النيل الجاف5.

لم يشفع للولايات المتحدة توجّهها للداخل بعيدًا عن النظام العالمي المنهار من أجل مواجهة العواصف الضخمة على ساحل المحيط الأطلسي أو إطفاء حرائق الغابات المستعرة دائمًا في الغرب؛ فالأسوأ لم يأتِ بعد؛ ستكون ميامي ونيو أورليانز تحت الماء قبل انتهاء القرن، وستكون نيويورك البحرين الجديدة في موجات الحر6. فتغيّر المناخ يتسارع بطبيعة الحال، لا سيّما أنّ الطبقات الجليدية البيضاء في قطبي الكرة الأرضية بدأت بالذوبان إلى حدّ كبير، تاركةً فقط مياه المحيطات الداكنة التي تعكس ضوءًا أقلّ للشمس، وتسخّن سطح الأرض بشكل أسرع، فضلًا عن المخزون الهائل من غازات الاحتباس الحراري في سيبيريا وقاع المحيط، التي كانت عالقة في الكثبان الجليدية التي ذابت منذ ذلك الحين، والتي تسرّبت إلى الغلاف الجوي، فالحال صار مثل القطار الجامح، ولم يعد بمقدورنا إيقاف هذا التغيّر المناخي في الوقت الحاضر بل وخلال العشرة آلاف سنة القادمة7.

لقد توقّفت الجهود الدولية المتأخّرة للحدّ بشكل جذري من الانبعاثات العالمية، ولم تحظَ بعد المفاوضات الطارئة في الأمم المتحدة حول ضريبة الكربون العالمية بفرصة إيجاد أرضية مشتركة بين التكتلات المتنازعة؛ حيث يعارض تحالف شركات الوقود الأحفوري الكبرى والصناعات الثقيلة بشدّة ما يسمّونه المقترحات التعسفية لترك الوقود الأحفوري في الأرض، بحجة أنّ القيام بذلك من شأنه زيادة فقر العالم النامي. وعندما أصبح المسرح السياسي مهلهلاً، كان المحيط الهادئ قد ابتلع دولًا بأكملها - بما في ذلك جزر مارشال وتوفالو وفيجي.

لقد مضى وقت طويل على اتخاذ إجراءات حاسمة وجذرية، وفي ضوء هذا الإدراك المتأخّر صار من الواضح بشكل متزايد أنّ النمو السريع في الطاقة الشمسية قد أدّى إلى طمأنة الحكومات بشكل مزيف قبل أن تدرك التباطؤ غير المبرّر في تطوير الطاقة الشمسية. لقد تركت عملية الانتقال إلى الطاقة النظيفة تجري من بدون تخطيط أو بذل أي جهد، ولو أنّها قامت بدلًا من ذلك بتصحيح بسيط للمسار في تلك الأيام الأولى - من خلال التخطيط للمستقبل والاستثمار فيه - لكان من الممكن تجنب التوقعات القاتمة التي نحملها اليوم للمستقبل الآتي.

مستقبل أكثر إشراقًا

نحن الآن في العام 2050؛ وعلى الرغم من أن العالم يواجه تحديات خطيرة، إلا أنه لا يزال يتحكم في مصيره؛ فالسيناريوهات المرعبة للكوارث الاقتصادية والإنسانية، التي كان الكوكب ينجرف نحوها، لم تعد قيد البحث والنظر؛ والمناخ يتغيّر بشكل لا يمكن إنكاره، ولكن العمل بوتيرة متوازنة مكّن الدول من القدرة على التكيّف، وأصبحت حكومات العالم حاليًا تعطي الأولوية في عصر الذكاء الاصطناعي واقتصاد البيانات لتوفير فرص عمل لسكان العالم البالغ عددهم 10 مليارات نسمة.

أدّى الارتفاع الهائل في الطاقة النظيفة إلى منع خروج تغيّر المناخ عن السيطرة، وضمن هذا السياق أنعش النمو الاقتصادي وأخرج فقراء العالم من الظلام. ولأول مرة في التاريخ، بدأ الوقود الأحفوري في الانحسار بشكل غير مسبوق؛ فلم يبقَ غير عدد قليل من المصانع التي تستخدم الفحم والغاز الطبيعي في إنتاج الكهرباء وتشغيل المصانع، وتُلتقط انبعاثات الكربون ليُعاد استخدامها في العمليات الصناعية، أو تخزينها في باطن الأرض. ولا يزال النفط يُستخدَم بنسبة كبيرة في النقل العالمي، ولكن هذه النسبة تتضاءل سنويًّا مع زيادة استخدام الكهرباء والوقود النظيف بدلاً من ذلك.

تُعدّ الطاقة الشمسية العنصر الحيوي لثورة الطاقة النظيفة، فعلى مدى 3000 عام كانت الحضارات تتطلّع إلى تسخير الشمس؛ تلك الكرة النارية التي لا تنضب والتي يمكن أن تزوّد العالم بحاجاته من الطاقة لآلاف المرات. وأخيرًا، بدأ استخدام الطاقة الشمسية في العقود الأخيرة في الارتفاع بلا هوادة، الأمر الذي أدى إلى زيادة استحواذها على نسبة أكبر في سوق الطاقة على حساب الوقود الأحفوري، فصارت الطاقة الشمسية اليوم توفّر ثلث الحاجة العالمية من الكهرباء، وستُلبّى مع نهاية القرن معظم حاجات الطاقة في العالم من خلال تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية وحرارية وإلى وقود متنقل أيضًا، وسيُذكر القرن الحادي والعشرين حينئذٍ على أنه القرن الذي روّضت فيه البشرية الشمس في نهاية المطاف.

من الواضح أن تقنية الطاقة الشمسية المستخدمة اليوم لا تشبه كثيرًا الألواح الشمسية الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون التي أنتجتها الصين في العقود الأولى من القرن الحادي والعشرين. لقد لعبت تلك الألواح الكهروضوئية دورًا مهمًا في ازدهار تقنية الطاقة الشمسية بوصفها مصدرًا ملائمًا للطاقة، لاسيّما أنّ نجاحها المبكر أدّى إلى إقناع المستثمرين حول العالم بأنّ الطاقة النظيفة من الاستثمارات الأكثر أمنًا، ولا تزال مستمرة في ضخّ الكهرباء بانتظام من إحدى أقدم حدائق الطاقة الشمسية في العالم.

لكن الألواح الكهروضوئية البدائية ثقيلة الوزن وقبيحة الشكل، التي بلغت الحد الأقصى من حيث الأداء، سرعان ما تطوّرت لتصبح خفيفة الوزن وجذابة وأكثر قدرة في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء. وبحلول عام 2030م، كانت الطابعات الصناعية تنتج لفات من الطلاءات الكهروضوئية

الشمسية المتدرّجة الألوان والشفافية، وصارت تكلفة الطلاء الشمسي للمنزل بعد عقد من الزمان تعادل أسعار الدهان العادي.

أصبح المهندسون المعماريون مبتهجين؛ فنحن في منتصف القرن اليوم، ومعظم مباني المدينة مغلّفة بموادّ شمسية مولّدة للكهرباء، تلوّن النوافذ، وتعطي الواجهة مظهرًا جميلًا، وتقلّل من الانبعاثات الكربونية. وقد أسهمت الكهرباء شبه المجانية في تحوّل اعتماد الصناعات الثقيلة على حرق الوقود الأحفوري إلى استخدام الطاقة الشمسية، ولم تعد الطاقة الشمسية الكهروضوئية محصورة على المباني العصرية أو المنشآت الصناعية الضخمة؛ بل صارت المواد الكهروضوئية الآن خفيفة لدرجة أنّها توضع على أسطح الأكواخ المتهالكة في ضواحي الأحياء الفقيرة للمدن الكبرى في العالم النامي، وصار بإمكان أفقر الفقراء في المناطقة النائية شراء الطاقة الشمسية بكلّ يسر وسهولة. لقد قُضي على فقر الطاقة المدقع؛ فكل شخص على وجه الأرض لديه القدرة على الحصول على قدر من الطاقة الكهربائية، غير أنّه لا يزال يتعيّن علينا أن نعمل أكثر لمعالجة عدم المساواة في توزيع هذه الطاقة.

وعلى الرغم من أنّ فاعلية الطلاء الكهروضوئي الرائع تتوقّف على كمّية أشعّة الشمس وقوّتها في أوقات النهار، إلا أن تكلفتها الضئيلة تجعلنا نتغاضى عن هذا الأمر. ولأنّها اقتصادية، فيمكننا أن نفرش سجادة كهروضوئية شمسية فوق مساحات شاسعة من صحراء موهافي بولاية كاليفورنيا، مما يؤدّي إلى إنتاج الطاقة الزائدة التي تُهدَر في منتصف اليوم، وهذا يستدعي إنشاء محطة طاقة يُعتمد عليها في إنتاج كمّيّة ثابتة من الكهرباء في أوقات الذروة على طلب الطاقة.

ومع ذلك ما تزال ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية غير قادرة على إمداد كاليفورنيا بالطاقة بمجرد غروب الشمس. من حسن الطالع، تمّت معالجة هذه المشكلة من خلال تقنية شمسية مختلفة تمامًا ازدهرت في العشرينات من القرن العشرين بعدما أعلن المحلّلون موتها إلى الأبد؛ فمحطات الطاقة الشمسية المركزة، تستخدم جيشًا من المرايا لتركيز أشعّة الشمس وتوليد الحرارة التي يمكن أن تشغّل محطة توليد الكهرباء، تحسنت إلى حد كبير من حيث التكلفة والأداء. والأهم من ذلك أن هذه المحطات قادرة على تخزين الحرارة التي يمكن استخدامها في إنتاج الطاقة طوال الليل، لتصبح بذلك الطلاءات الكهروضوئية ومحطات الطاقة الشمسية المركزة معًا قادرة على إنتاج الكهرباء على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع، وبتكلفة بسيطة مقارنة بتكلفة تشغيل محطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري.

حلّ مصطلح "الطاقة الشمسية" في العقود الأخيرة محلّ "الطاقة الشمسية الكهربائية"؛ ذلك لأنّ الكهروضوئية وتقنيات الطاقة الشمسية الأخرى لا تولد الطاقة الكهربائية الآن فحسب، بل تنتج أيضًا أنواعًا من الوقود الحافظ للطاقة لاستخدامها في الأماكن التي يكون فيها التيار الكهربائي غير قليل الجدوى. وقد بدأت الشركات في منتصف الثلاثينيات من القرن العشرين في إنتاج كمّيّات كبيرة من

المواد التي تساعد على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى وقود هيدروجين، وتمكّن العالم بخطوات متواضعة، ولكنّها ثابتة، من إنتاج الوقود الشمسي النظيف؛ حيث تُحوّل المصافي الشمسية الهيدروجين إلى وقود سائل للمركبات والسفن والطائرات وإلى مجموعة أخرى من المنتجات، مثل الأسمدة والبلاستيك، تمامًا كما تقوم مصافي النفط بتحويل النفط الخام إلى منتجات مثل البنزين ووقود الطائرات والأسفلت.

لقد أصبح الهيدروجين ذاته وقودًا شائعًا للسّيارات والشاحنات، وصارت السيّارات التي تعمل بالوقود البترولي الآن خيارًا غير مفضل، على العكس من المركبات التي تعمل بالكهرباء والمركبات التي تعمل بالهيدروجين والتي لا تسهم في تلوّث الهواء المحلي. ونتيجة لذلك، فقد تراجعت مستويات تلوّث الهواء بعد أن بلغت ذروتها في عام 2040م، على الرغم من أنّ سكان المدن يشكون ازدحام الحركة المرورية.

يعود التطوّر التقني للطاقة الشمسية الذي يحدث اليوم للقرارات بعيدة النظر التي اتُّخذت منذ أكثر من ثلاثة عقود في القطاعين العام والخاص من أجل الاستثمار في الابتكار؛ فقد قادت الولايات المتحدة هذه الحملة وحقّقت أرباحًا كبيرة نتيجة لذلك، بعدما أصبحت السوق المشتركة لتقنيات الطاقة الشمسية حاليًا أكبر من الأسواق المنتجات للبترول. ومثلما تصدّرت أمريكا العديد من منافسيها في عام 2013 لتصبح أكبر منتج للنفط في العالم، ها هي تقود العالم بعد عشرين عامًا في تصنيع تقنيات الطاقة الشمسية بشكل ريادي. ولولا ذلك لأصبحت أمريكا تعتمد بشكل مقلق على واردات منتجات الطاقة من دول أخرى كالصين، لكنّها تمكّنت بدلًا من ذلك من تحقيق الازدهار وتأمين الطاقة بتكلفة بضعة مليارات من الدولارات سنويًّا، من خلال تمويل إضافي للبحث والتطوير تجربة التقنيات الجديدة، وهو مبلغ ضئيل بالنسبة إلى الميزانية الفيدرالية9.

تظل الطاقة الشمسية الكهروضوئية الطريقة الأكثر انتشارًا لتسخير طاقة الشمس حتى مع ازدياد شعبية التقنيات الأخرى، مثل الوقود الشمسي، وقد ابتكرت العديد من الدول تصاميم أنظمة الطاقة الخاصّة بها؛ من أجل التعامل مع التقلبات الهائلة في الكهرباء الناتجة من الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

على سبيل المثال، تعاونت الدول على بناء شبكات طاقة تمتد عبر القارة -معظمها في آسيا وأمريكا الشمالية- لتربط الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الصحاري المشمسة بالمدن المتعطشة للطاقة. ولا تُعدّ هذه الشبكات ضخمة فحسب، بل الأكثر ذكاءً؛ لأنّها تستطيع نقل الإشارات إلى مليارات الأجهزة المتصلة بالإنترنت؛ مثل مكيّفات الهواء، وسخّانات المياه، والآلات الصناعية - التي تكيّف حجم الكهرباء المطلوبة في أثناء التشغيل لكي تتناسب مع توافر إمدادات الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وبالإضافة إلى ذلك صار بالإمكان الاختيار من من بين أنواع الخيارات المختلقة لتخزين الطاقة الشمسية المتقطعة، وتتراوح هذه الخيارات من البطاريات إلى خزانات الطاقة الكهرومائية إلى

الآبار الجوفية. وبإمكان الشبكات أن تقرر بذكاء متى تشحن أو حتى تقلل من ملايين السيارات الكهربائية الموصولة بالكهرباء، التي تعمل بوصفها بطاريات متنقّلة لدعم الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

على الرغم من أنّ الطاقة الشمسية قد تصدّرت ثورة الطاقة في العالم، فإنّها تتطلّب وجود مصادر داعمة، ومن تلك المصادر طاقة الرياح ذات القدرة العالية؛ حيث ارتفعت طاقة الرياح بشكل مطّرد خلال هذا القرن. كما عزّزت نهضة الطاقة النووية الإمداد بالكهرباء الموثوقة بعدما واجهت الحكومات في جميع أنحاء العالم الرياح السياسية المعاكسة للاستثمار في جيل جديد من المفاعلات الأرخص والأكثر أمانًا. وعندما أدركت أن الأسوأ قادم، قامت شركات الوقود الأحفوري بدورها أيضًا، حيث موّلت بسخاء تطوير التقنيات التي تساعد على التقاط انبعاثات الكربون من محطات الوقود الأحفوري المتبقية وتخزينها؛ لقد استثمرت بكثافة في تطوير مشاريع الطاقة المتجدّدة.

وعلى الرغم من الخطوات العظيمة التي بذلتها الدول للحدّ من انبعاثات الكربون، فلا يزال المناخ يتغيّر بشكل كبير، وهنا تأتي الطاقة الشمسية لتعطي الأمل مرة أخرى لتلك الدول التي تسعى إلى التكيّف؛ فلتخفيف وطأة ندرة المياه، لجأت الدول إلى الطاقة الشمسية الكهروضوئية الرخيصة لتشغيل محطات تحلية المياه التي تحوّل المياه المالحة إلى مياه عذبة، كما أُعيد استخدام محطات الطاقة الشمسية المركّزة في العالم النامي في عمليات التبريد؛ للحفاظ على الإمدادات الغذائية التي تشتدّ الحاجة إليها في الحدّ من المجاعة.

يتنبّأ الإجماع العلمي الرصين بأنّ المناخ سيستمر في التغيّر في المستقبل المنظور؛ ولتحقيق الاستقرار تجري الحكومات مفاوضات نهائية قبل الكشف عن جهود ضخمة لامتصاص ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوّي، وتطالب بعض الدول الأكثر تضررًا من تغيّر المناخ بطرق بديلة كاستمطار الغيوم للاستفادة من المزيد من ضوء الشمس. ومن حسن الطالع أنّ التقليل الحادّ لانبعاثات الكربون العالمية من الطاقة أدّى إلى توفير الوقت اللازم للحكومات كي تبحث بعناية ما إذا كان سيُعاد بناء المناخ وكيفية القيام بذلك.

قد يجادل بعضهم في أنّ الطاقة الشمسية ظهرت بوصفها واحدة من أهمّ التقنيات -إن لم تكن الأكثر أهمّية- في القرن الحادي والعشرين، وربما لم يُضمن الانتصار على التحدّيات العالمية مثل تغيّر المناخ بعد؛ لكنها أعطت العالم فرصة لمحاولة تغيير ذلك.

لا شيء مستحيل

ربما يكون العالم في طريقه إلى المصير الأول في المستقبلين الموضّحين هنا، وهذا أمر مرعب. لكن هناك ما يدعو للتفاؤل: المستقبل الثاني ليس خيالًا علميًّا، بل هدفًا يمكن تحقيقه، ويجب على

العالم للوصول إلى ذلك مواجهة العديد من التحدّيات وتحقيق إمكانات الطاقة الشمسية على مستويات عالية، وهذا سيتطلب زيادة الاستثمار في الابتكار على قدر كبير.

ويعود السبب في أنّ الشمس، وعلى مدى آلاف السنين، استعصت على الجهود البشرية لتسخيرها - على الرغم من كونها المصدر الأكثر وفرة للطاقة على كوكب الأرض هو أنّ أشعّة الشمس يصعب فهمها إلى حدّ كبير، فكمّيّة ضوئها تتفاوت كثيرًا وفقًا للغطاء السحابي والوقت من اليوم وفصول السنة، في حين أنّ برميل النفط أو طن الفحم يُعدّ مخزونًا ثابتًا للطاقة يمكن استخدامه عند الحاجة. ومثل الوقود الأحفوري يتوزّع ضوء الشمس بشكل غير متساوٍ؛ ففي بعض الأماكن توجد الأشعّة الشمسية الحارقة؛ بينما تختبئ في أماكن أخرى خلف الغيوم. ومع ذلك فإن طاقة الشمس تصل مبعثرة إلى الأرض على عكس الطاقة المكدّسة في الوقود الأحفوري الكثيف؛ وعليه، يتطلب مجال الألواح الشمسية عادةً مساحة أكبر بمئات المرات لإنتاج المقدار نفسه من الطاقة مثل محطة الطاقة التي تحرق الغاز الطبيعي10.

لذلك، سيتطلب الأمر براعة بشرية لترويض هذا المصدر من الطاقة المتعبة. لقد قطعت الألواح الشمسية الكهروضوئية التقليدية التي تحوّل ضوء الشمس إلى كهرباء خطوات هائلة، وصارت في السنوات الأخيرة رخيصة بشكل كبير، كما اجتذبت مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية في عام 2016م استثمارات هائلة على مستوى العالم أكثر من أيّ نوع آخر من محطات الطاقة، لكن الألواح الشمسية الكهروضوئية لها قيود حقيقية فهي تولّد الكهرباء فقط عندما تشرق الشمس، ونتيجة لذلك، وعلى الرغم من نجاحها المبكر بوصفها مصدرًا متخصّصًا للطاقة، فلا بدّ من العمل عليها لتتفوّق على الوقود الأحفوري الذي يوفّر الطاقة عند الطلب.

يوجد العديد من تقنيات الطاقة النظيفة الجاهزة لتعويض العجز في حال تباطأ انتشار الألواح الشمسية الكهروضوئية من دون اللجوء إلى الوقود الأحفوري؛ فوفقًا للوكالة الدولية للطاقة (IEA)، بهدف خفض انبعاثات الكربون في العالم والحدّ من وطأة التغيّر المناخي، فقد جرى استخدام 23 من بين 26 من تقنيات الطاقة النظيفة في العام 2017 مثل، المصانع عالية الكفاية، والمفاعلات النووية، والوقود النظيف المستخدم في الشاحنات والطائرات، إلا أن ذلك الانتشار كان بطيئًا. وعلى العكس من ذلك، شهدت الطاقة الكهروضوئية، وطاقة الرياح، والبطاريات المستخدمة في الشبكات والمركبات الكهربائية انتشارًا تجاريًّا سريعًا11. لكن هذه التقنيات تواجه، بالرغم من ذلك، بعض التحدّيات؛ حيث تُعدّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح من مصادر الكهرباء المتقطعة، وتسهم البطاريات بشكل كبير في تخزين تلك الطاقة الناتجة منها، وإذا توقّفت الطاقة الشمسية الكهروضوئية عن التوسع، وصارت تمثّل دورًا ثانويًّا في مجال الطاقة النظيفة، فنحن مقبلون على المستقبل الأول، أما إن أردنا مستقبلًا أكثر إشراقًا فيجب أن تأخذ الطاقة الشمسية مركز الصدارة؛ لتعويض تقدّم تقنيات الطاقة النظيفة الأخرى المُخيب للآمال.

يجب ابتكار طرق جديدة لجذب صناديق الاستثمار وتمويلها؛ لكي تستمر الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الانتشار، كذلك يتعيّن على الدول إعادة تصميم أنظمة الطاقة الخاصّة بها، بدءًا بشبكات الكهرباء من أجل أن تتحمّل الإنتاج المتقطّع للطاقة الشمسية الكهروضوئية، ويتعيّن على العلماء والمهندسين أيضًا تطوير جيل جديد من تقنيات الطاقة الشمسية، لتخلف الألواح الكهروضوئية الموجودة حاليًّا، وتكون أكثر قدرة على استغلال ضوء الشمس الوفير، وتلبية الحاجات المتنوّعة للعالم من الطاقة.

إن هذه التقنيات الرائعة ليست ضربًا من الخيال، فهناك نماذج بدائية من هذه التقنيات موجودة بالفعل، وقد قطع العلماء في مختبرات البحوث في السنوات الخمس الماضية خطوات سريعة في إنشاء طلاءات شمسية كهروضوئية فعالة من مواد رخيصة جدًّا، ولا يزال الباحثون يحرزون تقدّمًا في عرض الجيل التالي من محطات الطاقة الشمسية المركزة، التي يمكن أن تخزّن ضوء الشمس بتكلفة منخفضة على شكل حرارة لتوليد الكهرباء ليلًا ونهارًا13. وحقّقت النماذج التجريبية مؤخّرًا على نطاق صغير ما يعدّه العديد من العلماء تقدّمًا عظيمًا بتحويل ضوء الشمس إلى وقود كثيف الطاقة وعالي الكفاية باستخدام موادّ غير مكلفة. وينفق المستثمرون بسخاء مقابل هذه التقنيات؛ على سبيل المثال، أطلق قطب التكنولوجيا ومؤسس شركة مايكروسوفت بيل جيتس Bill Gates صندوقًا استثماريًّا بقيمة مليار دولار واصفًا "الطلاء الشمسي solar paint" و"الوقود الشمسي solar fuels" إحدى أهم تقنيات الطاقة النظيفة الواعدة.

يدرك جيتس أنّ تسخير الطاقة من الشمس سيكون -على الأرجح- العنصر الوحيد الأكثر أهمّية في انتقال الطاقة النظيفة، لكنه يعلم أيضًا أنّ التقدّم الذي تمّ إحرازه حتى الآن -على الرغم من أنه مُشجِّع- ليس كافيًا لإطلاق الإمكانات الكاملة لضوء الشمس. وتكمن المشكلة في أنّ عددًا قليلًا جدًّا من الأشخاص الآخرين لديهم الاعتقاد نفسه.

سلوك القطيع

يتطلب الحراك العالمي نحو الابتكار أن تدرك الدول أنها تتجه نحو المستقبل الأول والمظلم، وأنّ عليها أن تفعل شيئًا حيال ذلك قبل فوات الأوان. قد يبدو اختيار أحد المسارين والاستعداد للمستقبل خادعًا؛ فكلا المستقبلين (المظلم منها أو المشرق) يشتمل على الألواح الكهروضوئية الشمسية الحالية التي تزداد شعبيتها على مدار العقد أو العقدين المقبلين؛ لذا لا يزال المسار الذي يسير فيه العالم غير واضح حتى الآن.

وهي غير مدركة تمامًا إلى أيّ المستقبلين نتجه، تبتهج الدول في جميع أنحاء العالم بوصول الألواح الكهروضوئية الشمسية الرخيصة، وتركز على تركيبها بأسرع ما تستطيع، فقد بلغت نسبة قدرة مشاريع الطاقة الشمسية في عام 2016م أكثرمن 50 بالمئة مقارنة بالعام الذي سبقه. وعلى الرغم

من أنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية كانت في ذلك العام لا تزال توفّر أقلّ من 2 بالمئة من الكهرباء في العالم، فإنّ هذا النمو السريع أقنع الحكومات بأنّ الطاقة الشمسية تسير على الطريق الصحيح لحل أكثر مشكلاتها صعوبة.

لكن هذه الدول ستصاب بخيبة أمل شديدة إذا تحقّق المستقبل الأول، واصطدم النمو المبكر للطاقة الشمسية بجدار في أثناء الطريق؛ غعندما كنت أزور أسواق الطاقة الشمسية المزدهرة -في آسيا أو الشرق الأوسط أو أمريكا اللاتينية- كنت أشعر بعدم الاستقرار بشأن الهوّة بين الآمال التي يمكن أن يحطمها المستقبل الأول، والانتصار الذي سيحقّقه المستقبل الثاني (المشرق).

نيودلهي، الهند

كنا نحتسي الشاي على شرفة تطلّ على الحدائق الشاسعة في مبنى فندق إمبريال الفاره في نيودلهي. مرتديًا بدلة مقلّمة أنيقة مع ربطة عنق من ماركة إرميس Hermès ومنديل جيب مطابق، أوضَح مَن كنت أتحاور معه في ذلك اليوم خطته لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة في الهند باستخدام الطاقة الشمسية. وأعرب عن ثقته عندما أشار إلى أنّ سجلّ شركته في العمل مع الحكومة يشير إلى أنّها ستؤمن شريحة من فطيرة الطاقة الشمسية المتنامية. لكن ما لم يتطرق إليه هو العائلة التي دعمت راهول مونجال؛ سليل إمبراطورية "هيرو" المهيمنة على صناعة الدرّاجات النارية في الهند.

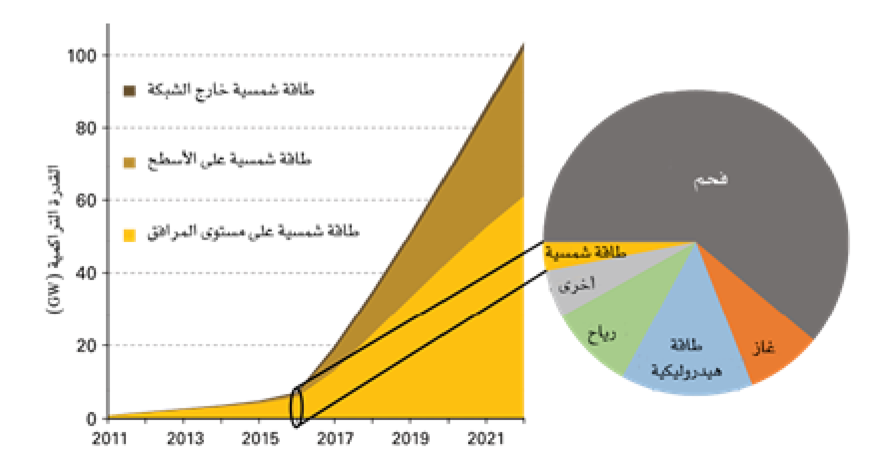
مونجال ليس المصنّع الوحيد الذي يغامر في مجال الطاقة الشمسية؛ فقد خاض المنتجون لكل شيء، بدءًا من المنسوجات وانتهاءً بالجرارات، غمار مجال قطاع الطاقة الشمسية في الهند16 17. علاوة على ذلك، اجتذب قطاع الطاقة الشمسية في الهند أيضًا لاعبين أجانب من أصحاب الثروات، والمؤسسات أمثال Softbank اليابانية18؛ إذ ينجذب المستثمرون نحو تعزيز الاقتصاد الهندي الآخذ في الاتساع بدعم من الحكومة لنيل حصّة من الطاقة الشمسية.

أشاد رئيس الوزراء ناريندرا مودي بالطاقة الشمسية بوصفها "الحلّ النهائي لمشكلات الطاقة في الهند"19؛ فبمجرّد أن تولى منصبه في عام 2014م، أعلن عن هدفه الجريء نحو تسخير الطاقة الشمسية في أنّ الهند ستُركّب بحلول عام 2022م 100 جيجاواط من الطاقة الشمسية (GW؛ مقياس: مقدار الكهرباء التي يمكن أن تضخّها محطة توليد الطاقة كلّ ثانية)؛ لتوفير ما يقرب من 10 بالمئة من استخدامها للكهرباء. تعهّد مودي بدءًا من الصفر بتركيب أكثر من نصف عدد الألواح الشمسية الموجودة في العالم بأسره في الهند، ولم يضيّع الوقت في البدء؛ فبعد عام من توليّه منصبه، تضاعف انتشار الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الهند سنويًا.

يراهن مودي على أنّ انخفاض تكاليف الطاقة الشمسية الكهروضوئية -التي انخفضت تكلفتها بمقدار ثلاثة أرباع بين عامي 2010 و2017م- سيمكّن الهند من الاستمرار في تركيب المزيد منها،

وتخطط حكومته لتسخير الطاقة الشمسية الكهروضوئية البارعة -التي يمكن أن تتّخذ شكل لوحة واحدة أو حتى مليون لوحة- لحلّ مجموعة كاملة من المشكلات الملحة.

كما يوضّح الشكل (1.1)، فإنّ هدف بلوغ الهند طاقة 100 جيجاواط يندرج تحت ثلاث تصنيفات. سوف تكون معظم التوسّعات في مجال الطاقة الشمسية المخطط لها في صورة مشاريع طاقة شمسية على نطاق المرافق- مزارع شمسية ضخمة تقع في أكثر المناطق المشمسة- التي تُعدّ أرخص من حيث البناء بفضل اقتصاديات وفورات الحجم. لكن أكثر من ثلث هذا الهدف مخصص للألواح الشمسية على الأسطح الموزّعة في مدن الهند المزدحمة. ويتبقّى بذلك حصّة صغيرة من الخطة المستهدفة هي عبارة عن أنظمة مستقلة عن الشبكة الكهربائية في القرى الريفية البعيدة عن شبكة الكهرباء الرئيسة20.



الشكل (1.1): أهداف الهند للطاقة الشمسية لعام 2022م، وبالمقارنة بتنوّع مصادر طاقتها الكهربائية في عام 2016م. الرسم البياني على اليسار يرسم هدف الحكومة بتسخير الطاقة الشمسية للوصول إلى طاقة بسعة 100 جيجاواط بحلول عام 2022م. بينما يقسم الرسم البياني على اليمين قدرة الهند في عام 2016م على توليد الطاقة الكهربائية من كلّ مصدر من مصادر الطاقة.
المصدر: International Energy Agency ,(2015) Sivaram, Shrimali, and Reicher.

يُعدّ الاقتصاد الهندي أحد الاقتصادات الرئيسة الأسرع نموًّا في العالم، وهو متعطّش للطاقة؛ فمع زيادة نموّ السكان، ينتقل المزارعون إلى المدن، وتطارد الطبقة الوسطى المتضخّمة سبل الحياة العصرية التي تعتمد على الطاقة بشكل كبير، ومن الممكن أن تضاعف الهند بحلول عام 2040م نسبة استهلاكها للطاقة إلى أربعة أضعاف ما تستهلكه اليوم. وتراهن الحكومة على أنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية ستكون المحرّك الأساسي للنمو، وتحلّ محلّ الطاقة المُنتجة من الفحم؛ ولذلك ألغت جميع خططها المتعلقة بإنشاء محطات جديدة للطاقة التي تعمل بالفحم.

هذا ليس كلّ شيء؛ فقد علقّت الحكومة آمالها على الطاقة الشمسية لتنقية هواء الهند الملوّث، وتهدف أيضًا -إلى جانب استبدال محطات الفحم الملوِّثة بمحطات توليد الطاقة الشمسية- إلى أن تحلّ الألواح

الشمسية الموجودة على الأسطح محلّ مولّدات الطاقة المنزلية التي تعمل بالديزل؛ لّلتخلص من الضباب الدخاني المنتشر حول المدن. ويأمل مودي بإنشاء أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة في المناطق التي لا تصلها شبكات الكهرباء. لقد طال انتظار ذلك في بلد يعاني فيه ما يقرب من 300 مليون شخص من عدم وصول الكهرباء كما يعاني كثيرون غيرهم في الحصول على كهرباء من دون انقطاع.

أخيرًا، تعتمد الحكومة الهندية على الطاقة الشمسية للوفاء بالتزاماتها الدولية أيضًا؛ فقد صارت الهند داخل دائرة الضوء العالمية بسبب تأثيرها السلبي والمتزايد في التغيّر المناخي، ومن المتوقّع أنها بحلول منتصف القرن ستتقدّم الهندعلى الصين والولايات المتحدة؛ لتصبح أكبر مصدّر لانبعاثات غازات الاحتباس الحراري في العالم. وتفاديًا لذلك، كان هدف حكومة مودي في الحصول على الطاقة الشمسية بسعة 100 جيجاواط هو الجانب الأكثر طموحًا -إلى حدّ بعيد- في تعهدها بشأن المناخ بموجب اتفاقية باريس لعام 2015م.

تطمح الحكومة الهندية من خلال الطاقة الشمسية إلى تحقيق إنجازات واسعة؛ كدعم النمو الاقتصادي، وتنظيف الهواء، وتسهيل الحصول على الطاقة، وكذلك الحدّ من تغيّر المناخ. إلا أنّ ذلك يعتمد بشكل كبير على التفاؤل باستقرار نمو الطاقة الشمسية في المستقبل؛ فمنذ عام 2012م إلى عام 2016م، وبالرغم من أنّ ما يقارب من 100،000 أسرة حصلت على الكهرباء بفضل أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة، إلا أن أكثر من 50 مليون أسرة لا تزال تعيش في الظلام22، 23. لقد تضاعف إجمالي سعة الطاقة الشمسية في عام 2016م، إلا أنّ الفحم لا يزال ينتج الطاقة الكهربائية بما يعادل أكثر من 50 ضعف ما تنتجه الطاقة الشمسية الكهروضوئية. 24 وحتى لو تمكّنت الهند من تحقيق هدف مودي الجريء في الحصول على الطاقة الشمسية بسعة 100 جيجاواط، فإنّ الوقود الأحفوري سيظلّ ينتج معظم الكهرباء في الهند؛ فمن أجل تحقيق ما تتطلّع الحكومة إليه من الطاقة الشمسية، يتعيّن على سوق الطاقة الشمسية النشطة حاليًّا، أن تستمر بالنمو في العقود القادمة.

لكن هذه السوق يمكن أن تهدأ تمامًا. لقد عانت الهند على مر التاريخ في الحفاظ على شبكات الكهرباء المتهالكة، وإذا استمرّ هذا الوضع، فقد لا تكون الشبكة قادرة على نقل الطاقة من الحقول الشمسية البعيدة إلى المدن النامية، أو التعامل مع زيادة الطاقة الشمسية غير المستقرة وانخفاضها. وبعد الموجة الأولى في انتشار الطاقة الشمسية الكهروضوئية، قد تجد الهند القليل من الفائدة لإضافة المزيد؛ حيث إنّ اللوحات الإضافية لن تحلّ مشكلة تلبية الطلب على الكهرباء الذي يبلغ ذروته في المساء، وقد تلجأ البلاد مضطرة نتيجة لذلك إلى البحث عن مصادر أخرى للطاقة الرخيصة؛ من أجل الحفاظ على نموّها الاقتصادي، وقد تدفعها هذه الحاجة إلى أن تكون مجبرة على مضاعفة إنتاج طاقة الفحم التي ستستمرّ في تلويث هواء الهند وزيادة انبعاثات الكربون25. وفي خارج قطاع الكهرباء، يمكن أيضًا أن تؤدّي الاستخدامات الأخرى للوقود الأحفوري مثل الدرّاجات البخارية

والسّيارات والشاحنات التي تعمل بالوقود البترولي، إلى تفاقم تلوّث الهواء في شوارع المدن الهندية المكتظة، بينما تظلّ المركبات الكهربائية قليلة الانتشار نسبيًّا.

المستقبل الأول سيكون كارثيًا على الهند، ولا يمكن أن تكون المخاطر على الأرض أكبر من ذلك. وبوصفها المصدر الأسرع نموًّا لانبعاثات الكربون في العالم، يمكن للهند أن تستمر في سعيها لاحتواء تغيّر المناخ أو أن تتوقف عن ذلك.

روكاشو، محافظة آوموري، اليابان

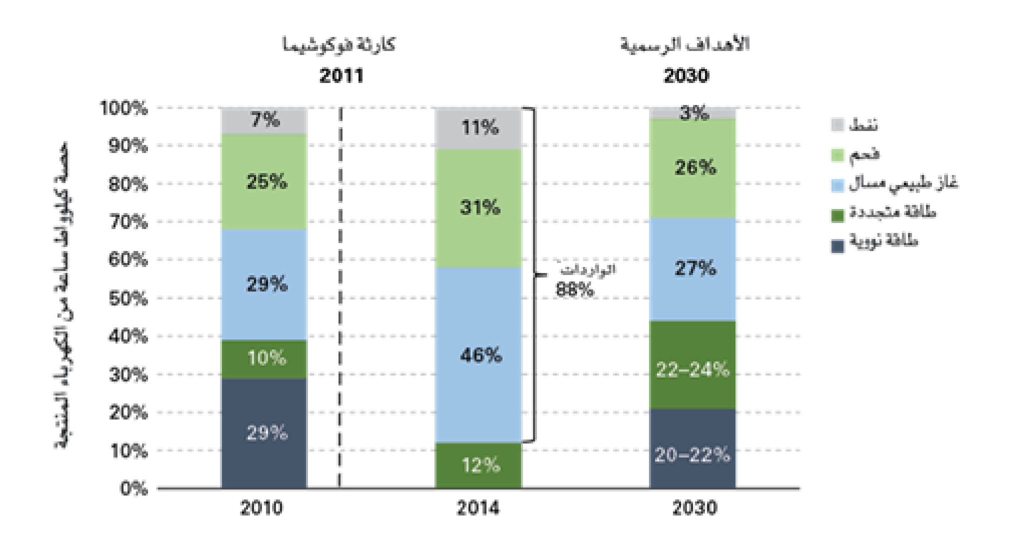
تشتهر الحافة الشمالية لهونشو، الجزيرة الرئيسة في اليابان، بقمم جبالها الخلابة وينابيعها الحارة؛ لذلك فإن مشاهدة مروج الريف الساحرة والوقوف على عتبات مصنع روكاشو لإعادة معالجة الوقود، يُعدّ نشازًا بصريًّا صارخًا؛ فقد صُمِّمت المنشأة لتحويل الوقود المستنفد من المفاعلات النووية اليابانية إلى وقود جديد؛ وذلك لتقليل الحاجة إلى واردات اليورانيوم. لقد تلقيت دعوة من الحكومة اليابانية للقيام بجولة في المصنع، وعلى الرغم من أنه لم يُسمح لي بالتقاط الصور، فإنّني ما زلت أتذكّر بوضوح المجمّع المترامي الأطراف للأبراج الكيميائية وخطوط الأنابيب المتشعّبة وأجهزة الطرد المركزي الضخمة. إنّها حقًّا أعجوبة هندسية؛ فبعد مرور ثلاثة عقود وإنفاق 25 مليار دولار على تكاليف البناء، تقرّر أخيرًا أن تُفتتح محطة روكاشو في عام 2018م.

تُعدّ روكاشو رمز الهوس الياباني:لتأمين مصدر الطاقة؛ فاليابان جزيرة لا تملك الكثير من موارد الطاقة المحلية، ولا تزال تعيش على هاجس تحقيق أمن الطاقة لديها منذ الصدمات النفطية في البعينيات القرن الماضي. وعلى مدى نصف القرن الماضي، رسّخت الطاقة النووية إستراتيجيّتها للسيطرة على إمدادات الطاقة في البلاد، ولكن في الوقت الذي تستعدّ فيه روكاشو لبدء إعادة تدوير الوقود النووي لإنهاء اعتماد اليابان على الواردات، أُغلِقَت معظم مفاعلاتها النووية، وتتطلع اليابان اليائسة الآن -نتيجة لذلك- إلى زيادة إمداداتها من الطاقة الشمسية بشكل عاجل لتحقيق الاكتفاء الذاتي من الطاقة.

لم تكن الطاقة الشمسية موضوعًا للبحث قبل أقلّ من عقد من الزمان، وفي عام 2010م، كشف صانعو السياسات في اليابان عن خطة طموحة لتأمين 70 بالمئة من حاجات الطاقة في البلاد من المصادر المحلية بحلول عام 2030م26، وكان محور تلك الخطة بناء ما يكفي من المفاعلات النووية لتزويد اليابان بنصف حاجتها من الطاقة.

بعد عام واحد فقط، وفي عام 2011م، تسبّب زلزال تسونامي في انصهار ثلاثة مفاعلات نووية في فوكوشيما-دايتشي، ما أدّى إلى تسرّب المواد المشعّة، وأجبر 164000 من السكان نتيجة لذلك على الإخلاء، ما تسبّب في صدمة شديدة للبلاد27، فأغلقت اليابان على الفور أسطولها الكامل من

المفاعلات النووية. ومع أن اليابان حققت 40 بالمئة من حاجاتها إلى الطاقة من المصادر المحلية قبل وقوع الحادثة، إلا أن هذا الرقم انخفض إلى 12 بالمئة في أعقاب كارثة فوكوشيما (الشكل 1.2). ومن أجل إعادة تشغيل المفاعلات النووية، تجري اليابان الآن عملية مراجعة دقيقة للمفاعلات ومواجهة التحدّيات القانونية بشكل جذري، إلا أنّها حتى نهاية عام 2016م لم تتمكّن من إعادة تشغيل سوى أربعة مفاعلات فقط من أصل خمسين مفاعلًا.



الشكل (1.2): مصادر توليد الكهرباء في اليابان قبل فوكوشيما وبعده. يبين الشريط الموجود على اليسار مصادر الكهرباء في اليابان في عام 2010م، قبل كارثة فوكوشيما عام 2011م، ويُظهر الشريط الأوسط مزيج المصادر بعد الكارثة في عام 2014م. وأخيرًا، يعرض الشريط الموجود على اليمين مزيج الكهرباء المستهدف في اليابان لعام 2030م.

المصدر: Institute of Energy Economics, Japan.

لجأت الحكومة لسدّ النقص إلى مصادر الطاقة المتجدّدة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وبفضل حجم المساعدات المالية الحكومية السخية، تضخّمت سوق الطاقة الشمسية في اليابان لتصبح ثالث أكبر سوق في العالم في عام 2016م[30]، انخفضت تكلفة الطاقة الشمسية في ذلك الوقت بشكل كبير، لدرجة أنّ الحكومة أوقفت معظم مبالغ الدعم المالي، ولا يزال من المتوقع أن تنمو الطاقة الشمسية بشكل كبير، حيث تستهدف الحكومة اليابانية توفير الطاقة الشمسية بنسبة 7 بالمئة من الكهرباء بحلول عام 2030م، ويتوقّع بعض المحللين الأكثر تفاؤلًا أن تصل الطاقة الشمسية فعليًّا إلى 12 بالمئة بحلول عام 2030م[31]، وهذا يُعدّ إنجازًا عظيمًا؛ لأن اليابان كانت تنتج أقلّ من 1 بالمئة من الطاقة الشمسية قبل كارثة فوكوشيما.

ولكن حتى 12 بالمئة لن تكون كافية لتحقيق هدف اليابان الذي تطمح له والمتمثل في تأمين معظم طاقتها من المصادر المحلية؛ ذلك لأنّ توقّعات الحكومة للطاقة النووية ربما تكون متفائلة للغاية؛ إذ تواجه الحكومة مقاومة شديدة من القضاة ومحكمة الرأي العام فيما يتعلّق بإعادة تشغيل المفاعلات،

حيث إنّ بناء مفاعلات جديدة تمامًا (التي ستكون ضرورية لاستبدال المفاعلات في نهاية عمرها الافتراضي) هو أمر سياسي غير قابل للنقاش؛ ولذلك قد لا تتمكّن الطاقة النووية من توفير حتى 10 بالمئة من حاجات اليابان من الكهرباء في العقود القادمة32.

ستتباطأ الطاقة الشمسية في المستقبل الأول قبل أن تتمكّن اليابان من تحقيق أمنها من الطاقة؛ فقد حذّرت محطات الطاقة اليابانية من أنّ شبكتها المتفكّكة قد لا تكون قادرة على دمج كمّيّات كبيرة من الطاقة الشمسية المتقطعة، وأن هناك تزايدًا في الحاجة إلى التخزين33.

ومع ذلك، تخطو اليابان خطوات صغيرة نحو تحقيق المستقبل الثاني؛ إذ تحتلّ المرتبة الثالثة في العالم في تمويلها للبحث والتطوير في مجال تقنيات الطاقة الشمسية المتقدّمة34، وهي متحمّسة لإنشاء اقتصاد هيدروجين على الصعيد الوطني لخفض واردات الوقود الأحفوري، وتطمح في يوم من الأيام إلى تشغيل مصانعها ومركباتها باستخدام طاقة تنتج من ضوء الشمس بدلًا من الوقود.

عندما غادرت روكاشو، كانت الرمزية تحيطني من كلّ مكان وأنا أقود المركبة، ومثلما كانت محطة إعادة المعالجة النووية ورائي الآن، فإنّ عصر التوسّع السريع للطاقة النووية ربما يكون وراء اليابان، بخيره وشره. وفي بضع دقائق وأنا على الطريق السريع، وجدت على يميني مجموعة من صهاريج المخزون الإستراتيجي من احتياطي البترول، لحماية اليابان من اضطرابات أسواق النفط العالمية. وكانت على يساري مزرعة للطاقة الشمسية. تمثّل هاتان اللوحتان المستقبلين المُحتملين لليابان؛ الأول يترك اليابان تحت رحمة واردات الطاقة الأجنبية، أما إذا تمكّنت اليابان من الاستثمار في الابتكار اللازم لتحقيق المستقبل الثاني، فتستطيع الدولة تحقيق الاكتفاء الذاتي الذي استعصى عليها منذ مدّة طويلة.

مكسيكو سيتي، المكسيك

أمسكت بطرف طاولة غرفة الاجتماعات في وزارة الطاقة وأنا أشعر بتوتر شديد، وتردّدت قبل تجربة المفردات الإسبانية التي حفظتها وأنا على متن الطائرة. استمع لي مضيفي وكيل وزارة الطاقة بصبر وأنا أتلعثم في سؤالي: "كيف استطاعت المكسيك التعاقد للحصول على الطاقة الشمسية بأقلّ تكلفة في العالم؟"

"بالطبع"، أجاب بعد ذلك بلغة إنجليزية لا تشوبها شائبة، " بكل بساطة، لقد فعلنا ذلك من دون الحصول على دعم حكومي؛ فقد أجرينا مزادًا مفتوحًا للحصول على طاقة رخيصة، وفاقت الطاقة الشمسية المصادر الأخرى كلّها، بما في ذلك الغاز الطبيعي، وهذا كلّ ما في الأمر".

تجتاح الطاقة الشمسية الكهروضوئية الرخيصة أمريكا اللاتينية، فقد أعلنت المكسيك في عام 2016م عن التوجه للطاقة الشمسية بسبب تكلفتها المنخفضة إلى حدّ كبير، وسرعان ما أعلنت

تشيلي وبيرو عن التوجه نفسه؛ حيث إنّ هذا الاتجاه يدفع الدول إلى تنفّس الصعداء؛ لأن وصول الطاقة الشمسية يمكن أن يحمي أمريكا اللاتينية من ويلات التغيّر المناخي.

لمعرفة السبب، ضع في حسبانك أنّ أمريكا اللاتينية تعتمد على الطاقة الكهرومائية أكثر من أيّ جزء آخر من العالم، حيث توفّر هذه الطاقة بوجه عام غالبية حاجات الطاقة في المنطقة، والتي يصل الاعتماد عليها إلى 70 بالمئة في بعض الدول مثل البرازيل. ومع ذلك يتسبّب التغيّر المناخي في حدوث حالات جفاف تؤدّي إلى استنفاد مخزون المياه من سانتياغو إلى ساو باولو، بالإضافة إلى أنّه يذيب أيضًا الأنهار الجليدية في جبال الأنديز التي تزوّد أنهار الأمازون العظيمة35؛ ولذلك ستواجه المنطقة نقصًا مزمنًا في الطاقة الكهرومائية مستقبلًا.

ومع انخفاض أسعار الطاقة الكهروضوئية، اغتنمت هذه الدول الفرصة لتعويض النقص بشكل متزايد في الطاقة الكهرومائية بمصدر طاقة نظيف، وبذلك برزت أمريكا اللاتينية الآن بوصفها واحدة من أكثر أسواق الطاقة الشمسية ازدهارًا على مستوى العالم، وتتطلّع بحلول عام 2021م للوصول إلى نسبة 10 بالمئة من الطلب العالمي على الطاقة الشمسية الكهروضوئية بعد أن كانت صفرًا قبل عقد من الزمان36.

وبالرغم من انتشارها المتزايد، إلا أنّه توجد مؤشّرات تحذيرية تدلّ على أنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية ستواجه تحدّيات في المنطقة؛ فقد أدّى اتساع منشآت الطاقة الشمسية الكهروضوئية في تشيلي على سبيل المثال، إلى إحداث وفرة في الطاقة في وقت ما بعد الظهر، ونتيجة لذلك فإنّ السعر الذي يمكن أن تجنيه المحطات الكهروضوئية في السوق مقابل الطاقة التي تنتجها خلال تلك الأوقات كان صفرًا بمعنى الكلمة،37 وبصرف النظر عن رخص هذه التكلفة، فإنّ إعطاء الطاقة مجانًا يجعل من المستحيل سداد تكلفة إنشاء محطة للطاقة الشمسية الكهروضوئية.

تُعدُّ تشيلي نذير شؤم لما يمكن أن يحدث في أمريكا اللاتينية في العقود القادمة، فعلى الرغم من الصورة الوردية للطاقة الشمسية التي نشهدها اليوم، ومع انضمام المزيد من عملاء الكهرباء مستقبلًا، فمن الممكن أن يؤدّي ذلك إلى تدهور قيمتها بشكل حادّ فور التشغيل، وإذا توقّف نموّ الطاقة الشمسية في أمريكا اللاتينية، بما يتسق مع سيناريو المستقبل الأول، فقد تعاني المنطقة نقصًا مزمنًا في الطاقة؛ حيث يتسبّب التغيّر المناخي في إحداث فوضى في محطات الطاقة الكهرومائية.

يكتفي معظم سكان المنطقة في الوقت الحالي -بكل بساطة- بركوب موجة الطاقة الشمسية الرخيصة، على الرغم من أنني شعرت أنّ قلّة قليلة تنتظر بقلق ما سيحدث بعد ذلك؛ فقد قال لي مسؤول آخر باللغة الإسبانية في وقت لاحق من لقاءاتي في مكسيكو سيتي: "عندما تكون المؤسّسة الخيرية عظيمة جدًّا، فحتى القديس لا يصدّقها." كان عليّ أن أترجم ما قاله لي، واتضح لي أنه كان يصف الطفرة الشمسية في المكسيك بأنها جيدة جدًّا لدرجة يصعب تصديقها.

دبي، الإمارات العربية المتحدة

وصلت إلى دبي في قمة الابتهاج لما سأقدّمه هناك؛ فقد دُعيت إلى مؤتمر قمّة الشرق الأوسط للكهرباء لإلقاء كلمة رئيسة حول مستقبل الطاقة الشمسية؛ ولذلك أعددت عرض شرائح مفصّلًا لمشاركة رؤيتي مع الجميع، ولكن بمجرّد أن صعدت إلى خشبة المسرح، وبدأت شريحة بعد شريحة باستعراض تفاصيل الطلاء الشمسي على ناطحات السحاب، ومعدّلات إبطاء التغيّر المناخي، والطاقة الرخيصة في العالم النامي، قوبلت بالتثاؤب من الجمهور؛ لقد لاحظت العديد من الحضور يعبثون بسمّاعاتهم. قلت لنفسي ربما توقّفت الترجمة الحيّة، وربما كانت الأجهزة الإلكترونية أكثر إثارة من الاهتمام بحديثي.

ثم استيقظ الجميع بشكل جماعي عندما استعرضت ما اعتقدت أنه مجرد نقطة ثانوية: على المدى القريب، يمكن أن توفر الطاقة الشمسية الكهروضوئية لدول الشرق الأوسط -ولا سيّما المملكة العربية السعودية- وسيلة لحرق كمّيّات أقلّ من النفط والغاز في الداخل، وبيع المزيد منه في الخارج. من الواضح أنّ هذا لم يكن جزءًا من رؤيتي طويلة المدى: في المستقبل، من المفترض أن تحلّ تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة محلّ الوقود الأحفوري.

لكنّ الجمهور أراد أن يسمع عن الكيفية التي تستطيع بها الطاقة الشمسية الكهروضوئية جني أرباح من الوقود الأحفوري (بصرف النظر عن المفارقة)؛ فالأشخاص الذين اتصلوا بي بعد حديثي كانوا جميعهم رجال أعمال لهم مصالح في السعودية والكويت وقطر، وهذه الدول الثلاث نفطية تعتمد اقتصاداتها في الغالب على عائدات النفط والغاز، لكنهم يهدرون حاليًّا كثيرًا من النفط والغاز في توليد الكهرباء وبيعها بسعر مخفّض جدًّا للعملاء المحليين، مما يشجّع الهدر في الاستهلاك الداخلي، ويحرم من زيادة نسبة الإيرادات العائدة من التصدير إلى الخارج؛ لذلك أطلقت الدول الثلاث برامج طموحة للطاقة الشمسية؛ لتحرير النفط والغاز للبيع الدولي بأسعار أكثر ربحية.

لدى المملكة العربية السعودية على وجه الخصوص خطط كبيرة للطاقة الشمسية الكهروضوئية، فقد أعلنت المملكة في أبريل 2017م عن برنامج طموح للطاقة المتجدّدة، وهو مكوّن أساسي في حملتها الكبرى لتحقيق التنوع الاقتصادي38. قد يكون اتّباع المملكة لخططها الخاصة بالطاقة الشمسية أمرًا مهمًّا لتحقيق الاكتفاء الذاتي في مجال الطاقة المتجدّدة؛ إذ تستهلك المملكة أكثر من ربع النفط الذي تنتجه لتوليد الكهرباء في الداخل، مما يحدّ من الكمّية التي يمكن تصديرها إلى الخارج39. لقد أدى اجتماع الصادرات المحدودة مع التراجع المستمر في أسعار النفط إلى خلق عجز متزايد في موازنة المملكة العربية السعودية.

قد تكون المملكة العربية السعودية على ما يرام في سيناريو المستقبل الأول، بينما ستكون بقية العالم أسوأ حالًا؛ فلو كان نصيبها من الكهرباء المتولدة من الطاقة الشمسية الكهروضوئية ضئيلاً، فإنّ عائدات صادرات النفط التي يمكن أن تجنيها قد تمكّنها من الإبقاء على عادات الإنفاق الباذخ السائدة

فيها. والأهم من ذلك في المستقبل الأول، أنّ العالم سيظلّ يعتمد على النفط بقوة، وهو أمر جيد بالنسبة إلى خزانة المملكة العربية السعودية، ولكنّها ستتمتع ببعض الفوائد في المستقبل الثاني أيضًا. وفي حال تمّت السيطرة على التغيّر المناخي، فقد تتجنّب موجات الحرارة المميتة، كما يمكن لتقنيات الطاقة الشمسية المحسنة أن تجعل الانتقال إلى الطاقة النظيفة أرخص بكثير على المستوى المحلي، مما يخفف وطأة تباطؤ الطلب العالمي على النفط السعودي.

من اللافت للنظر أنه حتى الدول المصدرة للنفط يمكن أن تجد جانبًا إيجابيًّا في المستقبل الثاني، حيث ستتحدّى الطاقة الشمسية هيمنة الوقود الأحفوري، وسيكون في كلا المستقبلين رابحون وخاسرون، ولكن سيكون هناك المزيد من الفائزين والعديد من المكاسب الأخرى إذا تمكّن العالم من إدراك المستقبل الثاني، وليس الأول.

لقد رأينا هذا المشهد من قبل

ليست هذه المرة الأولى التي تعلق فيها الدول آمالها على تقنية ثورية للطاقة النظيفة في حلّ العديد من مشكلاتها؛ وسيكون من الحكمة أن يضع العالم تجربة الصناعة النووية في الحسبان؛ وهو يحاول سدّ الفجوة بين وعد الطاقة الشمسية والواقع على الأرض.

لقد توقّع لويس ستراوس Lewis Strauss؛ رئيس هيئة الطاقة الذرية الأمريكية، في عام 1954م أن الطاقة النووية ستكون "رخيصة جدًّا إلى حد لا يُصدّق خلال جيل واحد فقط، بحيث يتكون كلفة قياس عداداتها أعلى من قيمتها"40، وذهب أحد خلفائه؛ جلين سيبورج Glenn Seaborg، إلى أبعد من ذلك، حيث توقّع في عام 1969م أنّ الطاقة النووية ستعمل على التخفيف من ندرة المياه والغذاء، وستزوّد المصانع الآلية بالطاقة، وتُمكّن الجميع من العمل لمدّة عشرين ساعة في الأسبوع41 .

ومع ذلك، فإنّ تلك التنبّؤات لم تتحقق؛ فقد حقّقتاتخذت الطاقة النووية مسارًا جيدًا في البداية، فسرعان ما ارتفع إنتاجها للطاقة في النصف الثاني من القرن العشرين؛ إذ بلغت في عام 1996م (17.6) بالمئة من الطاقة العالمية، لكنّها لم تتجاوز هذا الرقم أبدًا، وانخفضت منذ ذلك الحين حصّة الطاقة النووية من الكهرباء العالمية بشكل مطرد؛ حيث بلغت في عام 2016م قرابة 10٪.

ما الذي حصل؟ أحد التفسيرات هو أنّ الحوادث والنشطاء والتكاليف المتصاعدة شكلت عقبة في إنشاء مفاعلات جديدة في جميع أنحاء العالم المتقدّم، ومن هذا المنظور لا علاقة لتاريخ الطاقة النووية بما قد يأتي به مستقبل الطاقة الشمسية، فمن الصعب تخيّل أن انهيار مزرعة للطاقة الشمسية قد يحدث رد فعل سياسيًّا عنيفًا، غي الوقت الذي تنخفض فيه تكاليف إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتبدو أنها ستستمر في الانخفاض.

ولكن يوجد سبب آخر أكثر عمقًا، يدلّ على أنّ الطاقة النووية قد تعطينا دروسًا مستفادة؛ فمن المعروف جيدًا أنّ تقنية المفاعلات النووية التجارية تعاني الركود، وكلّ محطة نووية حول العالم كانت لأكثر من نصف قرن مفاعلًا يعمل بالماء الخفيف، وهو تصميم يمكن أن يؤدّي في حالات نادرة إلى حدوث تسريبات، مثل مفاعل تشيرنوبيل أو فوكوشيما، بينما ظلّت التصاميم المتقدّمة التي يمكن أن تكون أرخص وأكثر فاعلية ومقاومة للانهيار مرسومة على الأوراق لعقود.

قد تواجه الطاقة الشمسية ركودًا تقنيًا مشابهًا؛ فكلّ لوحة شمسية كهروضوئية تُباع حول العالم تقريبًا مصنوعة من السيليكون، وقد عمل الباحثون والشركات على مدى نصف القرن الماضي على رفع أدائها إلى ما كانوا يفترضون، وحوّلوا في بعض الحالات أكثر من 20 بالمئة من طاقة الشمس إلى كهرباء. وبالتأكيد تصبح الألواح الشمسية كلّ عام أكثر رخصًا، لكن المكاسب التي تحققها هي تحسينات تدريجية في خطوط التصنيع وسلاسل الإمداد، وليس تقدّمًا معرفيًّا في المختبر43. وفي الوقت نفسه، يُعدّ الاستثمار في الابتكار قليلًا بشكل مقلق؛ حيث تستثمر الشركات الضخمة في آسيا، التي تهيمن على الصناعة، أقلّ من فلس واحد من كلّ دولار من الإيرادات في البحث والتطوير في مجال التقنيات الجديدة.

في حالة ركود التقنية، فإنّ الطاقة الشمسية معرضة لخطر السير على خطى الطاقة النووية، كما يحدث في الرؤية الأولى للمستقبل، ومن الممكن أن يتوقّف أيضًا توسّع الطاقة الشمسية إذا لم تتمكّن الدول (خاصة تلك الموجودة في العالم النامي) من بناء شبكات الطاقة الخاصّة بها، والاستثمار في سبيل استيعاب حصّة متزايدة من الطاقة الشمسية؛ ويمكن أن تصل نهضة الطاقة الشمسية في تلك الدول إلى ذروتها عاجلًا وليس آجلًا.

إن الرؤية التي تنبّئ بتباطؤ تطوّر تقنية الطاقة الشمسية أمر حقيقي. ويجادل كثيرون في أنّ تكلفة الطاقة الشمسية ستستمرّ في الانخفاض في حالة إنتاج وتركيب المزيد منها. وعلاوة على ذلك، فإنّ تكلفة البطاريات المستخدمة في تخزين تلك الطاقة آخذة في الانخفاض بشكل متوازٍ أيضًا، ويرجع السبب جزئيًّا في ذلك إلى الطلب على السيّارات الكهربائية، حتى إنّ بعض المحللين يتوقّعون أنّ التكلفة الإجمالية للألواح الشمسية والبطاريات قد تكون بحلول عام 2030م أرخص من أيّ بديل للوقود الأحفوري44. وإذا حدث ذلك -كما يقولون- فلن يكون التغيير التقني أو شبكات الطاقة المعزّزة ضروريين لاستمرار نموّ الطاقة الشمسية.

ولكن؛ ماذا لو كانوا مخطئين؟ بعد البداية النووية غير الموفقة، بدأ الوقت يداهم العالم في التحوّل إلى الطاقة النظيفة؛ حيث إنّ تحوّلات الطاقة العالمية تستغرق وقتًا طويلًا جدًّا، وهذا أمر غير مجدٍ. وكما أشار عالم الطاقة فاكلاف سميل Vaclav Smil، فإنّ التحوّلات العالمية للطاقة (على سبيل المثال من الخشب إلى الفحم إلى النفط) استغرق كلّ منها نصف قرن تقريبًا45. وإذا تمكن العالم من التخلص من انبعاثات الكربون في غضون نصف قرن، فستكون الفرصة متاحة لتجنّب تغير مناخي

كارثي46. أما إذا تلاشى التحوّل نحو الطاقة الشمسية بحلول منتصف القرن، فلن تكون هناك فرصة أخرى بعد ذلك.

في عام 2016م، توقعت دراسة متفائلة إلى حدّ ما أنّ التحول إلى الطاقة النظيفة يمكن أن يحدث بشكل أسرع بكثير؛ في غضون عقد أو عقدين فقط، إذا توافر الدعم المناسب من صانعي السياسات47. ويجادل بعضهم بأنّ وجود سياسات للمناخ أكثر منطقية من تلك التي لدينا اليوم، أمر لا مفر منه، وهم يؤكدون بذلك أنّ ويلات التغيّر المناخي ستقنع قريبًا الحكومات في جميع أنحاء العالم بسنّ تشريعات تضع تسعيرة لانبعاثات الكربون، وستعمل مثل هذه السياسات على تحسين التنافسية الاقتصادية للطاقة الشمسية بشكل أكبر، وتغذّي صعودها المستمر.

لكن تسعيرة الكربون لن تكون هي المنقذ؛ فالأماكن القليلة التي حدّدت فيها هذه التسعيرة، مثل الاتحاد الأوروبي وكاليفورنيا، تعدّ حتى الآن منخفضة لدرجة لا قيمة لها48. وأي عمل يرفع تسعيرة انبعاثات الكربون يمكن أن يواجه معارضة سياسية شرسة من الكيانات القوية مثل شركات الوقود الأحفوري. وعلى الرغم من أنّ العديد من شركات النفط قد أيّدت سعر الكربون المتواضع، فمن غير المرجح أن تقبل سعرًا مرتفعًا بما يكفي لتقويض أرباحها النهائية بشكل خطير.

تغيير المسارات

يمكن لواضعي السياسات مساعدة العالم على تبديل المسارات من المستقبل الأول إلى الثاني، فالتدخلات السياسية المستهدفة لتشجيع الابتكار يمكن تتبعها سياسيًّا، وقد تُحقّق عوائد كبيرة، لكن التحويل إلى المسار الثاني يصبح أكثر تكلفة في كلّ عام يتردد فيه العالم، وقد تنتهي الرحلة إلى المستقبل الشمسي في حال عدم اتخاذ قرار بإرساء الأساس اللازم للوصول إلى المستقبل الثاني الآن.

يستكشف الجزء المتبقي من هذا الكتاب ما يضمنه الابتكار في مجال الطاقة الشمسية وكيفية النهوض بها. وفي الفصول المتبقية في الجزء الأول سوف تأمهّد الطريقللموضوعأولاً من خلال تأريخ المدى الذي وصلت إليه الطاقة الشمسية، خاصة في العقد الماضي. إن صناعة الطاقة الشمسية لم تعد مشاريع منزلية صغيرة فهي تنمو بسرعة، وبالرغم من أنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية تجاوزت بعض الصعاب لكي تصبح ندًّا منافسًا للوقود الأحفوري، فإنّ الأمر يختلف تمامًا عن العقبات التي تواجه الطاقة الشمسية من أجل أن تفرض هيمنتها وتفوّقها على الوقود الأحفوري؛ لأنّ تحقيق ذلك سيتطلّب ثلاثة أنواع من الابتكار.

ومثلما يوضّح الجزء الثاني فإن النماذج الابتكارية المالية والتجارية ستمكّن الشركات من استغلال تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية الحالية، فما تزال الطاقة الشمسية الكهروضوئية اليوم تحاول

استقطاب المستثمرين الكبار الذين يموّلون مشاريع الوقود الأحفوري بانتظام.ومن الممكن مع بعض الهندسة المالية أن تصل صناعة الطاقة الشمسية إلى مجموعة كبيرة من الاستثمارات منخفضة التكلفة؛ من أجل نشر الطاقة الشمسية على نطاق غير مسبوق. وعلى الرغم من استعداد القرويين في إفريقيا أو الهند لدفع ثمن الطاقة الشمسية، فإنّ انتشار الطاقة الشمسية خارج الشبكة كان بطيئًا. أما الآن فقد تمكّنت مجموعة جديدة من رواد الأعمال من الدمج بين الهواتف المحمولة والبيانات الضخمة والألواح الكهروضوئية التقليدية معًا ببراعة؛ للوصول إلى هؤلاء القرويين، وتحقيق ربح من خلال ذلك؛ حيث تُبشّر هذه النماذج المالية والتجارية المبتكرة بدعم النشر السريع للطاقة الشمسية بأفق جميل على مدى العقد المقبل.

سيكون الابتكار التقني بعد ذلك الأفق الزمني أمرًا بالغ الأهمّية في استمرار توسّع الطاقة الشمسية. يستعرض الجزء الثالث من هذا الكتاب التقدّم المثير الذي أحرزته الطاقة الشمسية داخل المختبرات العلمية حول العالم؛ حيث يحرز الباحثون تقدّمًا في تطوير الطلاءات الكهروضوئية الشمسية، ومحطات الطاقة الشمسية المركّزة، ومولّدات الوقود من أشعّة الشمس، ولا تزال هذه التطوّرات تواجه طريقًا شاقًّا لتحقيق نجاحها التجاري، ومن دون توافر دعم متواصل من القطاعين العام والخاص، سيواجه الباحثون الأكاديميون تحديًا في جلب هذه التقنيات إلى السوق.

يقدّم الجزء الرابع ابتكارًا منهجيًّا من شأنه إعادة تشكيل أنظمة الطاقة في العالم؛ للاستفادة الكاملة من إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية الوفير، ولكن غير المستمرة. وعلى الرغم من أن القيام بذلك قد يكون ذا جدوى اقتصادية عالية، إلا أن ذلك سيتطلّب إعادة تحريك الصناعات الراكدة، وحشد الحراك السياسي نحو الابتكار. مثلاً، هذا يتطلّب إعادة تهيئة محطات توليد الطاقة الكهربائية أولًا؛ لتتمكّن من الاستجابة والتعامل مع تقلبات الطاقة الشمسية، ويتعيّن على الدول أن تكون على استعداد لاتخاذ خطوات جريئة وحكيمة لدعم المولدات الموثوقة، مثل المفاعلات النووية التي لا تنتج أيّ انبعاثات؛ من أجل تغطية العجز في الطاقة الشمسية المتقطعة.

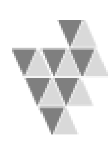
يستطيع صانعو السياسات حول العالم تسريع أنواع الابتكار الثلاثة جميعها. ويختتم هذا الكتاب بالتركيز على كيفية توفير الولايات المتحدة قيادة عالمية من خلال تبنّيها سياسات بعيدة المدى؛ فقبل كلّ شيء، يتعيّن على صانعي السياسات في الولايات المتحدة اتخاذ خطوات لتعزيز منهجية الابتكار التقني والتي لا تسير بسرعة النماذج الابتكارية المالية والتجارية، ويتعيّن عليهم أيضًا زيادة التمويل بشكل كبير؛ لتطوير تقنيات جديدة، والاستثمار في نظام طاقة أكثر مرونة.

إن من المؤسف أن يتوقّف دعم الابتكار في الولايات المتحدة في العقود الأخيرة، فقد صار تمويل ابتكارات الطاقة مهمّشًا في عهد الرئيس دونالد ترامب، وحتى وقت كتابة هذا التقرير، كانت السياسة الشمسية الوحيدة التي من المرجح أن تشرّعها إدارة ترامب هي إقامة قيود تجارية شاملة لحماية الشركات المحلية المصنّعة للخلايا والألواح الشمسية. ومن المحتمل أن تفشل هذه السياسة

في تشجيع الابتكار، ما سيُضعف سوق الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة، وقد تحرّض الصين على شنّ حملة تجارية مضادة. أما على المسرح الدولي، فسيُلحق الرئيس مزيدًا من الضرر بمصداقية الولايات المتحدة في قضايا الطاقة والمناخ، وسيعزل أمريكا دبلوماسيًّا في حال أوفى بعهده، وانسحبت الولايات المتحدة بالفعل من اتفاقية باريس لتغيّر المناخ في عام 2020م(**).

عندما يتعلّق الأمر بدعم الابتكار، سيكون التخلي عن الدور القيادي للانتقال إلى الطاقة النظيفة خطأً فادحًا، فعلى الرغم من وجود بعض الاستثمارات في مجال البحث لتطوير موادّ مستقبلية للطاقة الشمسية، فإنّها لن تؤتي ثمارها لسنوات طويلة، ويجب أن يتمّ العمل الآن للتأكّد من أن التقنية جاهزة عند الحاجة إليها. والأكثر من ذلك، أنّ بناء جدران على الحدود والحدّ من التجارة الحرة قد يؤدّي إلى توقّف الاستثمار في الابتكار، ومن الممكن أن يتسبب أيضًا في إبعاد الولايات المتحدة عن سوق الطاقة الشمسية العالمية الآخذة في التوسّع، والتخلي عن فرصة اقتصادية هائلة.

من ناحية أخرى، إذا تصرّفت الولايات المتحدة الآن، وألهمت الشركاء في جميع أنحاء العالم، ليحذوا حذوها، فيمكن أن تفتح قيادتها المصدر الأكثر وفرة للطاقة على الأرض للأجيال القادمة.



الفصل الثاني سنّ النضج

كنت في خريف عام 2007م حائرًا في عرضين مغريين يصعب التخلي عن أحدهما؛ الأول كان فرصة أن ألتحق بجامعة ستانفورد؛ وهي الجامعة التي طالما حلمت بها. أما العرض الآخر فكان أن أبقى مهندس عمليات في شركة ناشئة في وادي السيليكون تسمّى "نانوسولار" Nanosolar التي كانت ستغيّر العالم. الرئيس التنفيذي؛ مارتن روسشيزن Martin Roscheisen، وهو رجل أعمال ذو رؤية من ألمانيا، وضع ذراعه حولي، وقال لي بصوته الرخيم: "فارون Varun، سيكون مثل زيروكس بارك Xerox PARC "، وكان يشير إلى مجمع بالو ألتو Palo Alto للأبحاث الأسطوري الذي صمّم أجهزة الحاسوب الحديثة.

بدأت شركة "نانوسولار" بتسويق تقنيتها المعروفة بأنّها ثورية تمامًا؛ فقد ابتكرت الشركة بديلًا عن اللوحة الشمسية المصنوعة من السيليكون، حيث تستخدم هذه التقنية آلات شبيهة بآلات الطباعة، تنفث طبقة من الطلاء الخاص بالطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV -photovoltaic) مباشرة على صفائح معدنية رقيقة مصنوعة من الألومنيوم. وتتميز رقائق الطاقة الشمسية المُنتَجة بالمرونة العالية، وخفة الوزن بالإضافة إلى سعرها المنخفض؛ فبالإضافة إلى وزنها الضخم وشكلها الصلب وغير الجذاب، كانت الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون في ذلك الوقت باهظة الثمن، ممّا جعل تكلفة الكهرباء المُنتجة بوساطتها أكثر من ضعف تكلفة الشبكة1، فمادة السيليكون كانت مكلفة، فضلًا عن أنّ عملية تصنيع الخلايا الشمسية كانت تستخدم التقنية المستخدمة في إنتاج رقائق ميكروية باهظة الثمن، وقد خطّطت شركة روشيزن Roscheisen (التي كانت تعمل سابقًا في مجال الإنترنت) لتطبيق نموذج وادي السيليكون وإحداث تغيير في سوق صناعة الطاقة الشمسية المتثاقلة.

لقد كان وقتًا ممتعًا للعمل في مجال الطاقة الشمسية؛ فقد حاز الفيلم الوثائقي عن نائب الرئيس الأمريكي آل جور Al Gore "الحقيقة المزعجة An Inconvenient Truth" في عام 2006 على صدىً واسع في البلاد؛ فقد كان المستثمرون متعطّشين للحصول على فرصة للاستثمار في هذه السوق المتنامية، مما أدّى إلى إجراء تقييمات سوق الأسهم لشركات الطاقة الشمسية التي ظهرت مبكرًا. كانت الأجواء داخل (نانو سولار) متفائلة بشكل كبيركان الفريق على طاولة الغداء يحلم بشحن الطلاءات الشمسية الرخيصة إلى كلّ ركن من أركان العالم النامي، وتغطية صحاريه النائية كالسجاد؛ وسهرنا الليالي في إعداد النماذج الأولية من المنتجات؛ ليتباهى بها الرئيس التنفيذي أمام المستثمرين والمراسلين وكبار الشخصيات، الذين استمتعوا برؤيتنا وأثنوا عليها. تركت الشركة على مضض من أجل الذهاب إلى جامعة ستانفورد، لكنني بقيت أتابع التقدّم الذي كانت الشركة تحرزه في جمع رأس المال باستمرار؛ فقد حصلت شركة (نانو سولار) في عام 2008م على رأس مال

استثماري قيمته 300 مليون دولار، وهي أكبر شركة في وادي السيليكون بعد موقع التواصل الاجتماعي -فيسبوك-2، ولم يعد أي شيء مستحيلاً بالنسبة إلى الجيل الثاني من تقنية الطاقة الشمسية.

ثم انهار كلّ شي؛ إذ انخفضت أسعار الألواح الكهروضوئية بين عامي 2008م و2013م حتى بلغت نسبة الانخفاض 80 بالمئة، وأدّى تدفّق الألواح السليكونية الصينية الرخيصة إلى القضاء على معظم ما أنتجته الشركات الأمريكية الناشئة. ومن المؤكّد أن وادي السيليكون تحمّل جزءًا من اللوم، حين اتخذت الشركات قرارات تجارية غير مدروسة، وكذلك فقد المستثمرون صبرهم في محافظهم الاستثمارية. أما فيما يتعلق ب(نانو سولار)، فقد وسّعت الشركة نطاق التصنيع قبل أن تتخلّص من مكامن الخلل التقنية، ولم يكن بوسعها الاستمرار في المنافسة عندما وصل طوفان الألواح الصينية، وتراجعت الشركة في عام 2013م فعمدت إلى بيع أصولها مجزّأة مقابل سعر زهيد.

لكنّ شيئًا رائعًا حدث وسط كلّ هذه الاضطرابات، مما ساعد على نضوج الطاقة الشمسية؛ فمن خلال حرب الأسعار القصيرة والوحشية التي دمرت معظم منتجي الطاقة الشمسية في جميع أنحاء الولايات المتحدة وأوروبا، برز فائزان: الأول هو الصين التي فرضت هيمنة لا منازع لها في إنتاج الألواح الشمسية؛ إذ صارت أكبر مُصنّع في العالم. أما الفائز الثاني فكان مادة السيليكون التي طالما عُدَّت مادة احتياطية، وكان من المخطط أن تُستبدَل بها مادة أكثر كفاءة، لكنّها خالفت التوقّعات باستمرارها في الحفاظ على تقنية الطاقة الشمسية المتميّزة، ودفعت جميع المنافسين الآخرين جانبًا، فحوّلت الشراكة بين الصين والسيليكون صناعة الطاقة الشمسية إلى قوّة عالمية، حيث بلغ إجمالي المشاريع الاستثمارية في مجال الطاقة الشمسية حول العالم في عام 2016م نحو 116 مليار دولار. ويُعدّ ذلك أكبر استثمار للطاقة من أي استثمار في مصدر آخر؛ سواءً أكان نظيفًا أم غير نظيف3.

لقد آن الأوان؛ فلطالما حلمت البشرية بالاستفادة من إمكانات الشمس لآلاف السنين، وقدّم تطوير الخلايا الكهروضوئية في القرن العشرين طريقة للقيام بذلك. لقد كانت الطاقة الشمسية في البداية أقل أهمية مقارنة بالطاقة النووية، التي كانت تمثل قصة نجاح لمرحلة ما بعد الحرب، وتحظى بدعم الحكومة الأمريكية. دفع ذلك بعض شركات الطاقة الشمسية لتتوجّه إلى صقل التقنية الكهروضوئية في التطبيقات البعيدة والغريبة، مثل تشغيل منصّات النفط البحرية في خليج المكسيك، وأبراج الهاتف في المناطق الأسترالية النائية، والأقمار الصناعية في الفضاء، لكنّ الأمر تغير بعد ذلك، عندما أخذت اليابان وألمانيا زمام المبادرة من الولايات المتحدة في دعم صناعات الطاقة الشمسية المحلية؛ إذ بدأت الطاقة الشمسية الكهروضوئية تستعيد قوّتها في السنوات الأولى من القرن الحادي والعشرين. وعلى الرغم من أنّ صناعة الطاقة الشمسية في الصين كانت متواضعة في البداية، ولكنها بدأت الانطلاق قدمًا، ولم يعد أمام منافسيها أي فرصة.

وعلى الرغم أيضًا من أنّ صناعة الطاقة الشمسية بدأت في الصعود أخيرًا، فإنّها فقدت عنصرًا حيويًّا عندما فشلت الشركات الناشئة في وادي السيليكون، ولم يعد لدى الشركات الباقية أدنى شك بأنّ تقنية الطاقة الشمسية قد تتغيّر بشكل جذري. وبدلاً من التركيز على كل جانب على حدة، بدأت الشركات

بالتركيز على خفض التكاليف في مراحل التصنيع جميعها، بدءًا بالصناعات الأولية وحتى مرحلة التوزيع النهائي. ويبدو أنّ هذا النهج سيعمل على تعزيز استمرار النمو في السنوات القادمة، لكنه لا يؤدّي -على الإطلاق- إلى الابتكار الذي تحتاجه الصناعة من أجل تسخير الطاقة الشمسية على المدى الطويل.

ثلاثة آلاف سنة من العمل

يُعدّ الصعود المفاجئ للطاقة الشمسية الذي حصل مؤخّرًا عظيمًا مقارنة بالتاريخ الطويل من المحاولات الحثيثة الذي قامت به البشرية لتعرّف كيفية استخدام الطاقة الشمسية بوصفها مصدرًا رئيسًا للطاقة، حيث كان التركيز على الشمس بوصفها مصدرًا للطاقة لتسخين المياه بدلًا من توليد الكهرباء. وعلى الرغم من اختراع الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون منذ أكثر من ستين عامًا، فإنّها تُعدّ تقنية جديدة في سياق سعي البشرية لتسخير طاقة الشمس عبر آلاف السنين.

استخدم الصينيون اليانغتسوي yangsui، أو "المرايا المحترقة" منذ أكثر من 3000 عام؛ لتركيز ضوء الشمس بهدف إشعال النار، وهذا يعدّ أقدم استخدام بشري معروف للطاقة الشمسية، وفي القرن السابع قبل الميلاد، كان الصينيون رائدين في العمارة الشمسية؛ فصمّموا المنازل مواجهة للجنوب؛ للسماح بدخول الضوء والحرارة من الشمس خلال أشهر الشتاء، في حين حجبت طنفات الأسقف الشمس في أشهر الصيف الحارة لتلطيف درجة الحرارة، وقد ازدهرت العمارة الشمسية أيضًا في منطقة البحر الأبيض المتوسط؛ حيث ألقى سقراط محاضرات حول هذا الموضوع في اليونان في القرن الخامس قبل الميلاد. أما الرومان فقد اخترعوا في القرن الأول قبل الميلاد ما سُمّي هيليوكامينوس heliocaminus، وهي غرفة زجاجية تستخدم تأثير البيت الزجاجي في تدفئة الحمامات العامة4.

جذبت الطاقة الشمسية الحضارات القديمة لأسباب عدّة كالتي تجذبنا بها الآن؛ فقد استخدم سكان جزيرة ديلوس اليونانية العمارة الشمسية لترشيد استهلاكهم للطاقة ولرفع أمن الطاقة في حال واجهوا مشكلة في استيراد الأخشاب اللازمة. وتحوّل سكان المدن الصينيون إلى العمارة الشمسية بحلول القرن الرابع قبل الميلاد؛ للحفاظ على الطاقة، ومن ثم الحفاظ على البيئة؛ لأنّهم قضوا على معظم الأشجار المحيطة بهم بسبب التحطيب. لم يقتصر هذا المنطق على العصور القديمة فحسب؛ فقد شاعت العمارة الشمسية أيضًا في ألمانيا بعد الحرب العالمية الأولى بوصفها وسيلة للحدّ من الاعتماد على الوقود بعد أن احتلّ الحلفاء منطقة الرور الغنية بالفحم5.

كان المستوى التالي من التطوّر في تسخير الطاقة الشمسية هو تحويل ضوء الشمس إلى عمل ميكانيكي؛ فقد بنى هيرو السكندري اختراعِ أوّل مُحرِّك، وتوربين بخاريّ في العالَمِ يسمّى"أيوليبيل" aeolipile.

في القرن الأول الميلادي، وهو توربين بخاري يعمل على ضوء الشمس لتسخين الهواء الذي يدفع المياه من غرفة إلى أخرى. وركّز معظم المخترعين الآخرين على استخدام ضوء الشمس لتسخين المياه بدلًا من ذلك لأداء الأعمال الميكانيكية، ومن الأمثلة الجريئة بشكل خاص مرآة يبلغ طولها 4 أميال صمّمها ليوناردو دافنشي لتسخين مياه المصنع (بدأ في بنائه لكنه لم ينته أبدًا).

وحقّق أستاذ الرياضيات الفرنسي أوغستين موشو Augustin Mouchot القفزات الأكثر إثارة للإعجاب في تشغيل الطاقة الشمسية؛ لقد كان له تصوّر لثلاثة استخدامات للطاقة الشمسية، ولا تزال قيد التطوير بشكل نشط حتى يومنا هذا: قيادة محرّك حراري، وتوليد الكهرباء، وإنتاج الوقود المحمول. بنى في عام 1874م أول محرّك شمسي في العالم في مدينة تور بفرنسا، من خلال استخدام مرآة مخروطية الشكل طولها 8 أقدام؛ لتركيز طاقة الشمس على مرجل يقود محرّكًا بقوّة 2/1 حصان (تجدر الإشارة هنا إلى أنّ هذا يكفي لتشغيل بعض الأدوات الكهربائية تقريبًا في ورشة النجارة الحديثة). ثم اكتشف بعد ذلك في عام 1879م كيفية تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء، عن طريق عكس ضوء الشمس لتسخين تقاطع معدنين ملتحمين معًا، لتوليد تيار كهربائي، ثم استخدم هذه الكهرباء في تقسيم الذرّات المكوّنة للماء (الأكسجين والهيدروجين)؛ بهدف تخزين الهيدروجين للوقود. لم يكن أي من هذه التطبيقات الثلاثة فعّالًا من حيث التكلفة، وسرعان ما تخلى موشوت عن بحثه، لكنّه نجح في إلهام الاستخدامات الحديثة للطاقة الشمسية6.

كان أول شكل من أشكال الطاقة الشمسية التي لاقت رواجًا تجاريًّا تسخين المياه بالطاقة الشمسية؛ ففي مطلع القرن العشرين، انتشرت سخانات المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية في جنوب كاليفورنيا، مما وفّر لأصحاب المنازل مدخّرات كبيرة بدلاً من استخدام الفحم أو الغاز لتسخين مياههم. بقيت كاليفورنيا سوقًا مهمّة للطاقة الشمسية، فبحلول عام 1977م، سُخّن 60 بالمئة من بِرك السباحة الولاية بوساطة الطاقة الشمسية، وفي عام 1979م، ركّب الرئيس جيمي كارتر نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية على سطح البيت الأبيض8.

كذلك نمت الأسواق الدولية بسرعة؛ فقد استخدم اليابانيون بحماس سخانات المياه الشمسية، حيث استخدموها في بعض الحالات لتدفئة الحمامات العامة المعروفة، لكن الصينيين كان لهم النصيب الأكبر في استخدام الطاقة الشمسية، حيث استحوذت بحلول عام 2010م، على 70 بالمئة من سخّانات المياه الشمسية على مستوى العالم. يُشار إلى أنّ نسبة الطاقة الشمسية المستخدمة في التدفئة على مستوى العالم تشكّل 1 بالمئة مقارنة بأنواع الطاقة الآخر7.

على الرغم من أن تسخين المياه بالطاقة الشمسية قد شهد ارتفاعًا ملحوظًا خلال القرن الماضي، فإنّ النمو الهائل للكهرباء شمسية المصدَّر قد طغى عليه؛ أي الطاقة الشمسية. (ملاحظة: غالبًا ما يستخدم مصطلح "الطاقة" بالتبادل مع "الكهرباء". ومع ذلك، فإن تعريفه التقني هو مقدار الطاقة المنقولة لكلّ وحدة زمنية). توجد طريقتان حديثتان لتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء؛ الأولى من خلال قيام محطات الطاقة الشمسية المركزة بتجميع أشعّة الشمس من أجل تسخين المياه، أو وسيلة أخرى مثل

الأملاح المذابة لإنتاج البخار الذي يحرّك المولد. والطريقة الثانية، من خلال عمل الألواح الكهروضوئية الشمسية المصنوعة عادةً من السيليكون، لتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء، وعلى الرغم من أن كلتا الطريقتين لهما جذور في أواخر القرن التاسع عشر، فإنّ التطوّر الكبير الذي مرّت به في القرن العشرين مكّن من تسويقها بشكل جيد.

بعد اختراع موشو المحرّك الشمسي، حقّق المخترعون الأمريكيون العديد من التطوّرات التي تنصب في النهاية لدعم محطات الطاقة الشمسية المركزة اليوم؛ فقد بذل رواد الأعمال الأمريكيون جهودًا كبيرة في مطلع القرن العشرين؛ لإظهار تصاميم جديدة تساعد على تركيز ضوء الشمس وتوليد الحرارة بكفاءة، وظهر في عام 1901م عاكس على شكل وعاء، تمّ توصيله لأول مرة بمحرّك بقوّة خمسة عشر حصانًا، في مزرعة للنعام في باسادينا/ كاليفورنيا. (وُصفت هذه الأداة الغريبة بأنها عجب العجاب)، ثم رفع رائد الطاقة الأمريكي فرانك شومان Frank Shuman في عام 1911م رأس المال الاستثماري؛ لبناء صفوف من مجمّعات الطاقة الشمسية على شكل حرف U في الصحراء المصرية لتشغيل أنظمة الري. وحصل مواطن أمريكي بعد عقود؛ في سبعينيات القرن الماضي، على براءة اختراع لمخطط تقوم فيه التشكيلات الدائرية للمرايا الشمسية بتركيز ضوء الشمس على نقطة واحدة فوق برج طاقة مركزي.

وحدث تقدّم آخر يتمثّل في تخزين جزء من الحرارة لاستخدامها عند غروب الشمس؛ فقد نجح أحد التركيبات الشمسية في نيدلز بولاية أريزونا في عام 1904م في تشغيل محرّك على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع، عن طريق تخزين بعض الماء الساخن في وقت لاحق. ألهم التقدم في تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة وتخزين تلك الحرارة معًا، صناعة الطاقة الشمسية المركزة؛ حيث تستخدم المحطات الحرارية الشمسية الجديدة بشكل متزايد في الوقت الحاضر نموذج البرج لتوليد الطاقة، المزوّد بمخزن حراري مدمج، بحيث تستطيع المحطة توليد الكهرباء على مدار الساعة9.

ومع ذلك، ونظرًا إلى انخفاض تكلفة الألواح الشمسية الكهروضوئية مؤخّرًا بشكل أسرع بكثير من محطات الطاقة الشمسية المركزة، فقد تسارع تبنّي التنقية الأولى، بينما تباطأ اعتماد الأخيرة إلى حدّ كبير. وبحلول نهاية عام 2016م، استُخدمت 5 جيجاواط فقط من سعة الطاقة الشمسية المركّزة التي تمّ تشغيلها على مستوى العالم، مقارنة بما يزيد على 300 جيجاواط من الطاقة الكهروضوئية10 11. لقد مهّد القرن التاسع عشر الطريق لصناعة الطاقة الشمسية العالمية كما نعرفها اليوم؛ ذلك أنّ تطوير الخلايا الكهروضوئية بدأ يسير على المسار نفسه الذي كانت عليه في ذلك القرن.

من السيلينيوم إلى السيليكون

بدأت قصة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في عام 1839م، عندما اكتشف الفيزيائي الفرنسي إدموند بيكريل Edmond Becquerel التأثير الكهروضوئي، حين غمر كلوريد الفضة في محلول

حمضي، وعرّضه للإضاءة باستخدام أقطاب بلاتينية، مما أدّى إلى توليد جهد كهربائي. ولاحظ بيكريل أيضًا أنّ أفضل نتائجه جاءت من استخدام الضوء الأزرق أو فوق البنفسجي، وهي ظاهرة لم يستطع تفسيرها.

اكتشف المهندس الإنجليزي ويلوبي سميث Willoughby Smith بعد أربعين عامًا أنّ مادة السيلينيوم، وهي مادّة تُعرف اليوم باسم شبه الموصل للكهرباء، صارت أكثر قدرة على توصيل الكهرباء عند تعرّضها للضوء. وقد اختبر الباحثون في كينغ كوليدج بلندن هذا الاكتشاف عن طريق تعريض السيلينيوم لضوء الشموع، ثم فحص الشمعة بشكل فوري؛ وذلك لأنّ السيلينيوم يفقد القدرة على خاصّية التوصيل بشكل سريع، فاستنتجوا أنّ سبب النشاط الكهربائي ناتج من أنّ الضوء سريع الحركة، وليس لأنّ الحرارة بطيئة المفعول. كان هذا السلوك غامضًا تمامًا للعلماء في ذلك الوقت، لكنّ ذلك لم يمنع المخترع الأمريكي تشارلز فريتس Charles Fritts، من بناء الألواح الشمسية الأولى من السيلينيوم، وتركيبها على سطح أحد المباني في مدينة نيويورك في عام 1884م12.

تمكن ألبرت أينشتاين من حلّ اللغز المحيّر بعد مرور عقدين من الزمن، وشرح كيف يتحوّل الضوء إلى كهرباء؛ ففي ورقة بحثية صدرت عام 1905م وفازت -بعد حين من الزمان- بجائزة نوبل في الفيزياء، افترض أينشتاين أنّ الضوء يتكوّن من حزم صغيرة -أو فوتونات- من الطاقة13، وأوضح أنّ الفوتون يمتلك أحيانًا طاقة كافية ليخرج إلكترونًا من مداره المعتاد حول نواة ذرّة في معدن أو شبه موصل، ويستطيع ذلك الإلكترون التحرّك بحرّية، ومن خلال تحرير عدد كافٍ من الإلكترونات، يمكن لتيار من الفوتونات أن يولّد تيارًا كهربائيًّا.

حلّت نظرية أينشتاين ببراعة السؤال المزعج حول سبب إنتاج بعض ألوان الضوء للتيار الكهربائي دون الألوان الأخرى؛ إذ تعتمد طاقة الفوتون على لونها، حيث تمتلك الفوتونات الزرقاء والبنفسجية أعلى طاقات في قوس قزح؛ وتُعدّ الفوتونات الحمراء هي الأدنى، وتتمتّع بعض الألوان بنشاط يكفي لطرد الإلكترونات من مداراتها، بينما تبحر فوتونات الألوان الأخرى عبر مادّة كهروضوئية، بحيث تحدّد هذه المادة الألوان التي يتمّ امتصاصها بدلًا من نقلها.

ولكن على الرغم من أنّ النظرية تمّت تجربتها على أرض الواقع، فإنّ الخلايا الكهروضوئية ظلت غريبة ومثيرة للفضول لنصف القرن القادم؛ فقد كتب مسؤول تنفيذي في شركة وستنجهاوس الأمريكية في عام 1935م أنّ أجهزة السيلينيوم، التي حوّلت 0.5 بالمئة فقط من طاقة الشمس إلى كهرباء، ستحتاج إلى أن تصبح أكثر قدرة بخمسين مرة لتصبح عملية14. وفي الحقيقة أن خلايا السيليكون الكهروضوئية الحديثة اليوم تتمتّع بكفاءة بنسبة 26 بالمئة؛ أي ما يقرب من خمسين مرة أفضل من سابقاتها من السيلينيوم. (الخلايا الكهروضوئية الشمسية هي ببساطة لبنة البناء الأساسية للوحة الشمسية، ويمكن أن تتراوح الخلايا في الحجم من ظفر الأصبع إلى اليد كلها، حيث يستخدم الحجم الأول في مجالات بحثية عادةً، بينما يستخدم الحجم الثاني في الألواح الشمسية التجارية التي

تُعدّ أقل كفاءة إلى حدّ ما من الخلايا الفردية الصغيرة، ومن الممكن أن يؤدّي توصيل الخلايا معًا لإنشاء لوحة إلى فقد الطاقة بشتى الطرق).

لم تكن خلايا السيليكون الأولى بهذه الكفاءة بالتأكيد، ففي عام 1953م أدرك جيرالد بيرسون وكالفن فولر Gerald Pearson and Calvin Fuller باحثان في مختبرات بيل Bell Laboratories اللذان ساعدا في اختراع ترانزستور السيليكون، لبنة بناء الحاسوب الحديث أنّ أجهزتهما شديدة الحساسية للضوء؛ لذا استعانا بداريل شابين Daryl Chapin الذي كان يبحث عن طريقة لتشغيل منشآت الهاتف عن بُعد، وبنى الثلاثي أوّل خلية شمسية من السيليكون الكهروضوئية. وعلى الرغم من أنّ أجهزتهم الأولى كانت فعّالة بنسبة 2.3 بالمئة فقط، فقد أدّى ذلك إلى إزالة عنصر السيلينيوم من الماء15. ثم عمل شابان بإصرار على تحسين خليّة السيليكون الشمسية، وكُشف النقاب في العام التالي؛ أي عام 1954م، عن خلية كهروضوئية فعّالة بنسبة 6 بالمئة وسط ضجة كبيرة؛ حيث ذكرت صحيفة نيويورك تايمز أنّ التقدّم قد يؤدّي إلى "تسخير الطاقة اللامحدودة للشمس واستخدامها في البناء الحضاري"16.

الأسطح الخضراء

لسوء الطالع، لم يكن التوقيت مناسبًا؛ حيث لاقى ظهور الطاقة النووية صدىً كبيرًا أدّى إلى التقليل من أهمّيّة تقنية الطاقة الشمسية السيليكونية، ما دفع صناعة الطاقة الشمسية الناشئة للبحث عن الأماكن البعيدة داخل كوكبنا وخارجه لكي تبيع بضاعتها، ومنذ ذلك الحين والصناعة -في الواقع- تسير بسرعة هائلة.

ألقى الرئيس دوايت دي أيزنهاور في عام 1953م خطابه "تسخير الذرّة من أجل السلام" أمام الجمعية العامة للأمم المتحدة، موضّحًا رؤيته "الاستخدام العالمي والفعّال والاقتصادي" للطاقة النووية17، كان هدف هذه الرؤية هو الحصول على قبول جماهيري حول التقنية النووية، وقد تمّ الاستحواذ على الدعم الحكومي مما جعلها تتفوّق على الطاقة الشمسية. في عام 1955م أُقيم مؤتمر كبير للطاقة الذرّية في جنيف جذب رؤساء الدول، وعُقدت على الجانب الآخر -بعد ثلاثة أشهر فقط- الندوة العالمية الافتتاحية حول الطاقة الشمسية التطبيقية في فينيكس/أريزونا، ولم تحظَ بالكثير من الاهتمام آنذاك، وبالكاد حصلت على التغطية الإعلامية.

كانت تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية في ذلك الوقت لا تزال باهظة الثمن؛ فقد كانت تكلفة إنتاج خلية واط واحد 286 دولارًا، ما يعني تكلفة 1.4 مليون دولار للألواح الشمسية لتشغيل منزل أمريكي واحد18. لكن تمويل البحث والتطوير الضروري لخفض التكلفة لم يكن متاحًا كما حضيت به الطاقة النووية من اهتمام، فقد اقتصر تمويل الحكومة الأمريكية للبحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية خلال الخمسينيات من القرن الماضي على 100،000 دولار سنويًّا، في حين كانت الطاقة النووية

تتلقى أكثر من مليار دولار سنويًّا19. ونتيجة لذلك، تقلّصت استخدامات تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية لتوليد الطاقة بشكل تجاري. وعلى العكس من ذلك تمامًا، ازدهرت الطاقة النووية، وهو ما يناقض التوجّهات الحديثة.

ولكن حتى مع قيام الرئيس آيزنهاور بسحب البساط من تحت صناعة الطاقة الشمسية الناشئة من خلال مشروعه " الذرّة من أجل السلام"، إلا أنه أعاد الأمل للطاقة الشمسية مجددًا بعد عامين، عندما أعلن في عام 1955م أن الولايات المتحدة تنوي إطلاق قمر صناعي مدشّنًا بذلك بدء سباق الفضاء وسرعان ما ظهرت الطاقة الشمسية للساحة مجدّدًا، فكانت الحل الوحيد الذي يمكّن الأقمار الصناعية من العمل لأجل غير مسمّى؛ فلو تمّت الاستعانة بالبطاريات أو الوقود فلن يكون هذا الأمر مُجديًا؛ نظرًا إلى عمرهما الاستهلاكي القصير. كان للسوفييت السبق في وجودهم في الفضاء مع سلسلة الأقمار الصناعية "سبوتنيك"، وأطلقت الولايات المتحدة في عام 1958م قمرًا صناعيًّا يعمل بالطاقة الشمسية، سُمّي فانجارد 1، واستمرّ اتصاله لاسلكيّا لمدّة أطول.

وعلى مدار العقد اللاحق، ومع تضخّم برنامج الفضاء، أحرزت طلبات على الألواح الشمسية تقدّمًا ملحوظًا، ما ساعد في الحفاظ على قيمة سوقية من 5 إلى 10 ملايين دولار20. وقد مكّنت هذه الحصة البسيطة عددًا قليلًا من الشركات من الاستثمار في تطوير ألواح شمسية ذات كفاية متزايدة؛ حيث كان من اللازم استخراج أكبر قدر ممكن من الطاقة من العدد المحدود من الألواح التي يمكن إرسالها إلى الفضاء. وبفضل سباق الفضاء أخذت صناعة الطاقة الشمسية الناشئة تنمو ببطء من حيث الحجم والتطوّر.

كانت التطبيقات المبكرة للطاقة الشمسية على أرض الواقع بعيدة كلّ البعد عن الحضارة، وكانت ميزة الطاقة الشمسية على الوقود البترولي أو البطاريات هي قلّة صيانتها (يمكنك ترك الألواح الشمسية خارج المنزل لمدّة عقد أو أكثر، ويمكن الوثوق بها لتوليد الطاقة بشكل يومي)، وهذا جعلها جذابة في الحالات التي تكون فيها الصيانة الروتينية غير عملية. وهكذا، استخدمت أستراليا الألواح الشمسية لتشغيل مكررات الإشارة اللاسلكية وأنظمة الهاتف البعيدة في المناطق النائية، وموّلت شركة إكسون في السبعينيات من القرن الماضي إحدى شركاتها الخاصّة (شركة الطاقة الشمسية Solar Power Corporation)؛ من أجل نشر أنظمة الطاقة الشمسية على منصّات النفط البحرية في خليج المكسيك21 22.

من المفارقات العجيبة أنّ شركات النفط استثمرت بشكل كبير في الطاقة الشمسية منذ بدايتها، فبالإضافة إلى إكسون كان لدى شركات النفط الأمريكية (موبيل وآركو وأماكو) وحدات تُعنى بالطاقة الشمسية، وقد نجحت آركو في عام 1980م في تحقيق أكبر رهان باستثمارها أكثر من 200 مليون دولار لإنشاء أول محطة للطاقة الشمسية بسعة أكبر من واحد ميغاواط (MW)، لتصبح بذلك أكبر منتج للطاقة الشمسية في العالم.

دخلت شركات النفط إلى هذا المجال لعدّة أسباب، منها أن الطاقة الشمسية يمكن أن تكون مفيدة في مجال عملها التجاري، وذلك من خلال تشغيل المنصّات البحرية أو محطات الخدمة. وقد أسهم مهندسو الشركات ذوو المهارات المتعدّدة في تطوير هذه التقنية، أما آركو فكانت مسؤوليتها البيئية حافزًا لها لدخول مجال الطاقة الشمسية.

لكن شركات النفط الأمريكية تخلصت من محافظها من الطاقة الشمسية بحلول التسعينيات من القرن الماضي، في الوقت الذي بدأ فيه منتجو النفط الأوروبيون يبحثون عن حصتهم من السوق. في ذلك الحين كانت شركة بريتيش بتروليوم ورويال داتش شل قد تصدرتا قائمة أكبر أربعة منتجين للطاقة الشمسية23. وفي نهاية المطاف، قررت الشركات الأمريكية الابتعاد عن مشاريع الطاقة الشمسية بعد إدراكها أنها لا تصبّ في مجال اهتمامها التجاري. وبحلول العقد الأول من القرن الحادي والعشرين تبعتها الشركات الأوروبية؛ فتوقفت معظم الشركات عن الاستثمار في قطاع الطاقة الشمسية بعد أن تكبّدت خسائر مالية كبيرة، ولكنّ بعض منتجي النفط أبدوا اهتمامهم مرة أخرى مع توقّعات النمو السريع لسوق الطاقة الشمسية الذي نشهده اليوم. وقد استحوذت شركة النفط الفرنسية الكبرى توتال في عام 2011م، على حصة كبيرة من شركة صن باورSun Power المرموقة في مجال تصنيع الطاقة الشمسية وتطوير المشاريع.

دفع ارتفاع أسعار النفط العالمية في السبعينيات من القرن العشرين حكومة الولايات المتحدة إلى إعادة تفعيل صناعة الطاقة الشمسية، وسعت على مدى عقد من الزمن للقيام بدور قيادي على مستوى العالم لتكون رائدة في مجال الطاقة الشمسية؛ ذلك أنّ سعر النفط تضاعف أربع مرات في الولايات المتحدة في أعقاب أزمة حظر النفط العربي على الدول الداعمة لإسرائيل في عام 1973م، ثم تضاعف السعر ثلاث مرات أخرى بحلول عام 1979م عندما أفزعت الثورة الإيرانية أسواق النفط العالمية.

قادت إدارة الرئيس جيمي كارتر حملة للترويج للطاقة الشمسية من خلال الكونجرس؛ من أجل مواجهة نقص البنزين والاختناق الاقتصادي، وشمل ذلك زيادة الدعم لمشاريع البحث والتطوير، وائتمانات ضريبية تصل حتى 30 بالمئة من أجل تركيب الألواح الشمسية وسخانات المياه، فضلًا عن الضوابط الملزمة لمحطات توليد الطاقة لشراء الطاقة من المولّدات المستقلة مثل مزارع الطاقة الشمسية. وسمح الكونغرس بحلول عام 1980م بصرف أكثر من مليار دولار سنويًّا كمكافآت تحفيزية لاستخدامات الطاقة الشمسية، بما في ذلك 150 مليون دولار أمريكي للبحث والتطوير الكهروضوئي للطاقة الشمسية24. وأدّى دعم الحكومة للطاقة الشمسية إلى تفوّق صناعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية الأمريكية التي شكلت بحلول الثمانينيات 85 بالمئة من مبيعات الطاقة الكهروضوئية العالمية25.

لكنّ هيمنة الولايات المتحدة على كلّ من صناعة إنتاج الألواح الشمسية وسوق التركيب لم تدم طويلًا؛ حيث أدّت أيديولوجية إدارة الرئيس رونالد ريغان القادمة، والانهيار في أسعار النفط في الثمانينيات، إلى انخفاض دعم الحكومة الأمريكية للطاقة الشمسية، وقد جرى وقف ائتمانات كارتر الضريبية على

الطاقة الشمسية في عام 1985م. واستطاع الرئيس ريغان مع إدارته إقناع الكونجرس في عام 1988م بخفض تمويل البحث والتطوير للخلايا الكهروضوئية بنسبة 75 بالمئة، مقارنة بما كانت عليه عام 1980م26. كان الرئيس ريغان متحيّزًا للطاقة النووية، ولم يكن مقتنعًا بالإعانات المالية المتعلقة بمصادر الطاقة غير التنافسية مثل الطاقة الشمسية، وملتزمًا أيديولوجيًّا فقط بتمويل الأبحاث العلمية الأساسية، بدلًا من البحث والتطوير التطبيقي والمشاريع التي كان يدعمها سلفه27. لسوء الطالع، بدلًا من تمكين الشركات الأمريكية من تمويل البحث والتطوير التطبيقي ذاتيًّا، أدّى سحب الدعم الحكومي إلى خروج الشركات الأمريكية من السوق بكل بساطة؛ فعلى سبيل المثال، باعت موبيل وآركو أقسام الطاقة الشمسية لشركات ألمانية في أوائل التسعينيات من القرن الماضي.

انتهزت اليابان وألمانيا الفرصة للقيادة وملء الفراغ الذي أحدثه تراجع الولايات المتحدة عن الطاقة الشمسية، فأطلقت الحكومة اليابانية في التسعينيات برامج الحوافز الخاصّة بها؛ على سبيل المثال لتركيب 10000 لوح من ألواح السقف الشمسية في جميع أنحاء البلاد، وعزّزت كذلك دعمها للبحث والتطوير، وبفضل السوق المحلية القوية والابتكار الناتج في تلك المرحلة، صارت الشركات اليابانية مثل كيوسيرا وسانيو وشارب من منتجي الطاقة الشمسية العالميين الرائدين28.

أما ألمانيا فقد أنشأت بحلول العقد الأول من القرن الحادي والعشرين أكبر سوق في العالم لتركيب الطاقة الشمسية، وتحدّت شركاتها اليابان للسيطرة على إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية، وأقرّت في عام 2000م تشريعات تاريخية تقدّم حوافز كبيرة لمنشآت الطاقة الشمسية الجديدة؛ كضمان أفضل سعر ممتاز مضمون، أو رسوم إيصال التيار، فكان بإمكان مالك المنشأة بموجبها بيع استهلاك الطاقة الشمسية على مدار العشرين عامًا القادمة. وهكذا نشأت إنيرجيفيند Energiewende (تحوّل الطاقة) في ألمانيا. وعلى مدى السنوات العشر التي تلتها، كان لدعم السياسات السخيّ في ألمانيا الأثر في جعلها أكبر سوق للطاقة الشمسية في العالم، والتي ضمنت بمفردها تقريبًا نمو صناعة التصنيع الكهروضوئية العالمية29. وقد استحوذت ألمانيا بحلول عام 2010م على ما يقرب من نصف السوق العالمية لنشر الطاقة الشمسية30، وازدهر نتيجة لذلك إنتاج الألواح الشمسية من قبل شركة سيمنس وكيو - سيل وشركات ألمانية أخرى لتلبية الطلب المحلي.

خلال التسعينيات من القرن الماضي وحتى العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، واجهت الشركات الأمريكية بعض الصعوبات للدخول في المنافسة، وكان ذلك بسبب الدعم الحكومي المحدود لتحسين تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية، أو نشر المزيد من الطاقة الشمسية. ومع ذلك نمت الطاقة الشمسية إلى صناعة بمليارات الدولارات بفضل اليابان وألمانيا، إلّا أنّها كانت على وشك أن تعاني أزمة هوية.

الشمس المستعرة في وادي السيليكون

نمت صناعة الطاقة الشمسية العالمية على تقنية واحدة: الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون، وظلّ العلماء ورجال الأعمال -مع ذلك وعلى مدى عقود- يراجعون الجدول الدوري للعناصر الكيميائية؛ بحثًا عن موادّ بديلة للسيليكون يمكن أن تساعد في رواج الطاقة الشمسية بشكل أفضل. وأدّى هذا الانشقاق إلى مواجهة بين التقنيات القديمة والجديدة.

لطالما عَدَّ العلماء مادة السيليكون التي انتشر استخدامها لسهولة التعامل معها مادّة غير مثالية في صنع الخلايا الشمسية، فقد استخدم باحثو مختبرات بيل Bell Labs،الذين اخترعوا الخلية الشمسية الحديثة، السيليكون بسبب الاكتشاف الأخير ل(ترانزستور) السيليكون؛ حيث كان من السهل إعادة توظيف الترنزستور لاستخدامات أخرى، فصمّم الباحثون معدّات خاصّة لإنتاجه، ليكون بمثابة خلية شمسية. ولكن كان معروفًا أنّ السيليكون يمتصّ الضوء بشكل ضعيف؛ أي إنّ كمّيّة الضوء التي تمتصها قطعة سميكة من السيليكون يمكن أن تمتصها شريحة رقيقة من مواد أخرى. وعلى الرغم من أنّ السيليكون يمتصّ ألوانًا من الضوء أكثر من المواد الأخرى، فإنّ هذا الامتصاص الواسع يضحّي بالكثير من الطاقة الموجودة في الفوتونات الزرقاء والأشعّة فوق البنفسجية؛ فلا يمكن للسيليكون أبدًا أن يكون بالكفاءة نفسها للمواد الأخرى التي تمتصّ ألوانًا أقلّ، ولكنها تحصد المزيد من الطاقة من الفوتونات العالية الطاقة. أخيرًا، كان إنتاج السيليكون عالي النقاء، بحيث تُرتَّب الذرّات بترتيب بلّوري مثالي، ومن ثم تكون أكثر كفاءة في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء، يتطلّب معدّات باهظة الثمن، ويهدر الكثير من السيليكون، وينتج منه رقاقات هشّة تنكسر بسهولة.

سعى الباحثون بعدما أدركوا هذه العيوب النظرية للبحث عن بدائل. كان أحد أول اكتشافاتهم في عام 1967م، مادة مختلفة كليًّا، بل شكلًا مختلفًا من السيليكون يُعرف باسم "السيليكون غير المتبلور amorphous silicon "، الذي يمكن استخدامه في صنع أغشية ضوئية مرنة ورقيقة31. كان صنع الأغشية أرخص وأقلّ هدارًا للمواد الأولية السليكونية المكلفة، لكن الخلايا الناتجة كانت في الغالب بنصف كفاءة الخلايا البلورية التقليدية. ومن المفارقات أنها كانت تزداد سوءًا خلال الأشهر الستة الأولى من التعرّض لأشعّة الشمس قبل أن تستقر، وهو عيب مؤسف في المادة الشمسية! ونتيجة لذلك، لم ينجح السيليكون غير المتبلور بالشكل الذي كان مؤيدوه يأملون به في تصنيع ألواح الطاقة الشمسية، إلا أنه كان مادة مفضلة في التطبيقات المرنة أو المحمولة مثل آلة حاسبة بحجم الجيب.

توجد مادّة شمسية أخرى استطاعت الحصول على حصّة صغيرة في السوق، لكنّها واجهت صعوبات لتحقيق نجاح تجاري كبير؛ وهي زرنيخيد الغاليوم (GaAs)، فهي تُعدّ أكثر فاعلية من السيليكون البلوري ولكنها مكلفة جدًّا في عمليات الإنتاج. في عام 1970م، صنع العلماء السوفييت أول خلايا شمسية عالية الكفاءة من زرنيخيد الغاليوم. وبحلول التسعينيات، استطاعت التفوق على السيليكون بوصفها المادّة المفضّلة للتطبيقات الفضائية لفاعليتها العالية، ونظرًا إلى أنّها تأتي من مجموعة من المواد متعدّدة الطبقات من أجل الحصول على ألوان مختلفة من الضوء بكفاءة أعلى؛ حيث تستخدم المختبرات اليوم خلايا شمسية عالية الأداء مصنوعة من زرنيخيد الغاليوم ومجموعتها، على هيئة

خلايا ضوئية جهدية متعدّدة الوصلات. ويمكن لهذه الخلايا أن تتجاوز 40 بالمئة من الكفاءة؛ وهذه هي التقنية التي، على سبيل المثال، شغّلت مركبات وكالة الفضاء الأمريكية -ناسا- الجوالة على المريخ، ومع ذلك، لم يكن للخلايا الضوئية الجهدية متعدّدة الوصلات أثر تجاري كبير في سوق الطاقة الشمسية الأرضية؛ بسبب ارتفاع تكلفة إنتاجها.

جاء التحدي الأخطر لمادة السيليكون من مادتين فلميتين رقيقتين هما تيلوريد الكادميوم (CdTe) وسيلينيد نحاس الإنديوم غاليوم (CIGS)، اللتين تميزتا بقدرتهما العالية على امتصاص ضوء الشمس إلى جانب التكلفة التقديرية المنخفضة لتصنيعهما، وللقدرة العالية التي يمكنهما تحقيقها. ظلت هذه التقنيات على الهامش خلال التسعينيات، بينما استطاعت مادة السيليكون الهيمنة على السوق. واستطاع الباحثون رفع فاعلية الأفلام الرقيقة، لكن الشركات لم تحقق نجاحًا كبيرًا في بيع الألواح في السوق، إلّا أنّ شركة فيرست سولار First Solar الأمريكية تمكّنت في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين من زيادة إنتاج ألواح الطاقة الشمسية بتقنية CdTe بشكل سريع، التي كانت أقلّ فاعلية من السيليكون، لكن كلفة إنتاجها كانت أقل أيضًا.

بحلول عام 2006م بدا وكأن الأفلام الرقيقة قد نجحت، فعندما طُرحت شركة فيرست سولار قُيّمت آنذاك بمبلغ 400 مليون دولار. حدث تهافت كبير في وادي السيليكون عندما ضخ أصحاب رؤوس الأموال أموالهم في الشركات الناشئة التي تعمل على تطوير الأغشية الشمسية الرقيقة ووعدت بتخفيض كلفة المواد الأولية في التصنيع مقارنةً بخلايا السيليكون الشمسية باهظة الثمن. وتحقّق ذلك عندما انطلقت شركة نانو سولار Nanosolar (الشركة التي كنت أعمل بها)، وجمعت الشركة مئات الملايين من الدولارات لطباعة أغشية شمسية عن طريق الطباعة بنفث الحبر على لفائف من رقائق الألومنيوم. والأكثر غرابة أن شركة سوليندرا Solyndra خططت لتحويل الألواح الشمسية المسطحة إلى أنابيب أسطوانية يمكنها امتصاص الضوء من الاتجاهات جميعها، فأكسبتها هذه الرؤية مليار دولار من استثمار القطاع الخاص، إلى جانب ضمان قرض بقيمة 500 مليون دولار في عام 2008 من إدارة الرئيس باراك أوباما.

كان العديد من المستثمرين ورجال الأعمال الذين قادوا الازدهار في الشركات الناشئة في مجال الطاقة الشمسية قد عملوا سابقًا في صناعة أشباه الموصلات في وادي السيليكون، وكانوا آنذاك رائدين في معدات وتقنية صنع شرائح السيليكون الدقيقة للغاية للأجهزة الإلكترونية. وقد رأى هؤلاء المستثمرون المخضرمون في صناعة أشباه الموصلات، أنّ صناعة الطاقة الشمسية تكمن في الأسواق الراكدة- وهي الصناعة التي استعارت المعدات القديمة من خطوط إنتاج أشباه الموصلات والتي يبلغ عمرها عقود؛ من أجل تصنيع ألواح شمسية متواضعة.

كان والدي أحد هؤلاء الرواد؛ فقد ترك صناعة أشباه الموصلات في ذروة مجد وادي السيليكون في عام 2008م؛ لبدء إنشاء مشروع جديد للطاقة الشمسية يدعى توين كريكز تيكنولوجي Twin Creeks Technologies، فبدلًا من اختيار مادة جديدة تمامًا، حاول التمسك بمادة السيليكون ولكن

مع استخدامها بشكل أكثر فاعلية. لذلك جمع هو وفريقه مئات الملايين من الدولارات وصنعوا مدفعًا أيونيًا مذهلًا بحجم منزل؛ حيث يمكنه تقشير شرائح رقيقة من السيليكون وإعادة استخدام هذه المادة الثمينة بشكل أكثر كفاءة، وقد أشادت صحيفة نيويورك تايمز بالتقنية ووصفتها بأنها "راديكالية"32.

وفجأة، لم يعد السيليكون ثمينًا؛ فقد أدى إغراق السوق بمنتج البولي سيليكون في الصين إلى انخفاض سعره، وهي الخامة الأساسية التي تستخدم في صنع خلايا السيليكون الشمسية؛ حيث هبطت أسعار هذه المادة من نحو 400 دولار للكيلوغرام في عام 2008م إلى 50 دولارًا للكيلوغرام في عام 2010م33. ونتيجة لذلك، لم يعد من الضروري الاقتصاد في تكاليف المواد باستخدام تقنيات الأفلام الرفيعة أو السليكون الرقيق.

وبسبب تمسكها بمنتج يكلف 6.29 دولارات لكلّ واط لتصنيعه، ووصلت قيمته السوقية بالمقابل إلى 3.42 دولارات لكلّ واط، أعلنت شركة سوليندرا إفلاسها في عام 2011م، وصار دافعو الضرائب في مأزق لتغطية نصف مليار دولار من الديون34. هاجم عضو مجلس الشيوخ ورجل الأعمال مِت رومني Mitt Romney رهان الرئيس أوباما على شركة سوليندرا ووصفه بأنه "رمز الهدر الجسيم"35. على مدار العامين التاليين، أفلست كلّ من توين كريك تيكنولوجي ونانو سولار، أسوةً بمعظم شركات الطاقة الشمسية الناشئة الأمريكية، وخفّض أصحاب رؤوس الأموال بعد خسارتهم محافظهم الاستثمارية في مجال التقنية النظيفة، وصارت الطاقة الشمسية كلمة بغيضة في وادي السيليكون. أما والدي فقد ترك الطاقة الشمسية ليعود إلى صناعة أشباه الموصلات، حيث كان الابتكار لا يزال حيًّا ومنتعشًا.

لم تكن الصدمات الخارجية، مثل انخفاض أسعار السيليكون، هي الأسباب الوحيدة لانفجار فقاعة المشاريع الناشئة في مجال الطاقة الشمسية؛ فكما كتبت مع زملائي بن جادي وفرانك أوسوليفان Ben Frank O'Sullivan & Gaddy، من المحتمل أنّ توقّعات المستثمرين لهذه الشركات كانت غير واقعية منذ البداية؛ فقد كان على الشركات الناشئة تطوير مواد جديدة، وتعديل الآلات لتصنيع تلك المواد، وتصميم منتج جديد للطاقة الشمسية، ومن ثم إنشاء سوق لهذا المنتج. وكان عليهم أن يفعلوا ذلك كلّه في غضون ثلاث إلى خمس سنوات، وهي المدّة التي تقوم فيها صناديق رأس المال الاستثماري عادة بتسديد أموال المستثمرين36. وعليه، فقد ارتكبت الشركات الناشئة أخطاءً فادحة؛ مثل التسابق لبناء مصانع باهظة الثمن لتصنيع كميات كبيرة من الخلايا الشمسية الرفيعة، قبل أن تتمكّن من إنتاج كميات صغيرة من الخلايا الفعّالة على النحو المطلوب.

إنّ قيمة الخلايا الشمسية الرفيعة تتأرجح اليوم؛ حيث تمثّل أقلّ من 10 بالمئة من حصّة السوق التي يأتي معظمها من إنتاج شركة فرست سولار First Solar ومقرّها في الولايات المتحدة. ومع تلاشي الثورة التقنية في وادي السيليكون، فإنّ صناعة الطاقة الشمسية قد تعود إلى الساحة بقوة، ويعود الفضل في ذلك للصين ولإنتاجها الهائل من الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون.

الصين والسيليكون: فريق الأحلام

قد يكون من الغريب لو عرفنا أن جذور الهيمنة الصينية في مجال صناعة الطاقة الشمسية تعود إلى بحوث عالم في أستراليا؛ يدعى البروفيسور مارتن جرين Martin Green من جامعة نيو ساوث ويلز، الذي يُنظر إليه باعتزاز على أنه أب الخلايا الكهروضوئية. في السبعينيات من القرن الماضي، وبينما كانت الولايات المتحدة تضخّ الأموال في أبحاث الطاقة الكهروضوئية، أنقذ هذا العالم معدّات صُنعت أصلاً لمعالجة أشباه الموصلات "من كومة خردة"؛ للبدء في تطوير خلايا شمسية من السيليكون بكفاءة عالية37. عندما جفّت منابع تمويل الولايات المتحدة للطاقة الشمسية إبان إدارة رونالد ريغان، برزت عملية البحث التي يقوم بها جرين كواحدة من أفضل المختبرات في العالم، ووضعت التطوّرات العلمية التي حقّقها لاحقًا (في ثمانينيات القرن العشرين) بنية الألواح الشمسية السيليكونية الحديثة، وأخذ طلاب جرين هذه التقنية معهم وأنشؤوا شركات الطاقة الشمسية الصينية التي هيمنت بها على الصناعة العالمية.

ومع ذلك، وقبل ربع قرن، كان جرين الصوت الوحيد الذي يجادل بأنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون هي المستقبل؛ حيث أشار في أحد مقالاته التي كتبها في عام 1993م:

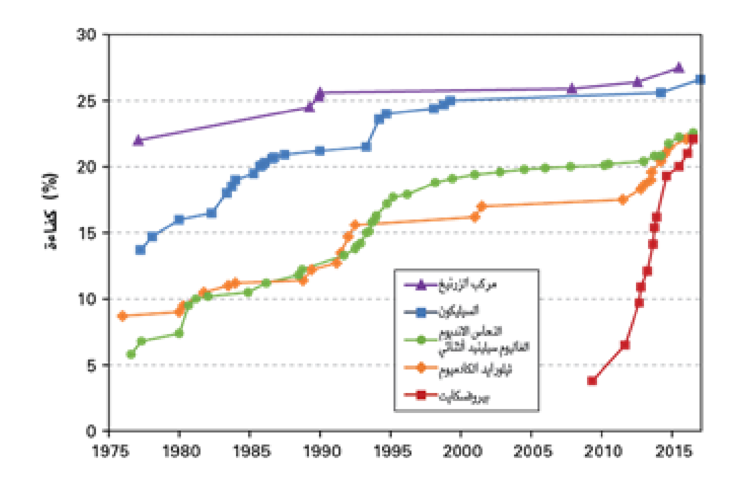
"منذ أن قدم السيليكون عصر الخلايا الكهروضوئية منذ أكثر من 40 عامًا، كانت خلايا السيليكون الشمسية "العمود الفقري" لصناعة الخلايا الكهروضوئية، واعتقد الكثيرون، بمن فيهم المؤلف الحالي، أنّ هذا كان حلًّا مؤقتًا، بينما كان المجتمع الكهروضوئي -بمستويات مختلفة من الصبر- ينتظر وصول مادة أكثر مثالية.

... إن السيليكون لديه القدرة على أن يصبح الحلّ النهائي للطاقة الكهروضوئية، عوضًا عن أن يكون حلًّا مؤقتًا... وتكمن نقاط القوة لـ [مادة السيليكون]، في مكانته الحالية في السوق، والتحسينات المستمرة على هذه التقنية، وما تبقى يعتمد على التحسينات التي تطرأ مستقبلًا بالإضافة إلى مدى استدامة هذه التقنية القائمة على السيليكون"38.

وخلافا للجداول الزمنية المتسارعة للشركات الناشئة في وادي السيليكون التي سعت إلى تحسين تقنيات الخلايا الشمسية الرقيقة في بضع سنوات فقط، إلا أن تقنية السيليكون نضجت على مدى عقود عدة؛ ففي سبعينيات القرن الماضي، اكتشفت شركة الأقمار الصناعية الأمريكية كومسات COMSAT، كيفية نحت أشكال هرمية دقيقة على سطح خلايا السيليكون الشمسية لضمان تقليل انعكاس الضوء من السطح، ومن ثم زيادة امتصاصه، وقد عُرفت هذه الخلايا باسم "الخلايا السوداء black cells"؛ لأنّها تمتصّ الضوء المرئي كلّه، ومن ثم يمكنها تحقيق فاعلية تزيد على 17 بالمئة39.

ثم تولى البروفيسور غرين زمام الأمور بدءًا من الثمانينيات، حيث كشف مختبره النقاب عن سلسلة رائعة من التحسينات على خلايا السيليكون الشمسية، ما رفعها إلى أكثر من 25 بالمئة من الكفاية

بحلول مطلع القرن الحادي والعشرين (انظر الشكل 2.1) 40 41. وحتى اليوم، يقوم كبار مصنّعي السيليكون بتبديل خطوط الإنتاج؛ من أجل محاكاة هندسة غرين لبناء الخلية الشمسية لتعزيز قدراتهم، ويعرف هذا التصميم باسم بيرك (PERC)42.



الشكل (1-2): مستوى كفاءات تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المختلفة. في نصف القرن الماضي. زاد العلماء تدريجيًا من فاعلية -أو النسبة المئوية للطاقة التي توفرها الشمس عند الظهيرة التي يمكن تحويلها إلى كهرباء- الخلايا الشمسية التي تم إنشاؤها واختبارها في المختبر. ويوضّح هذا الرسم البياني إرتفاع كفاءات السيليكون وزرنيخيد الغاليوم، وهي تقنية الرقائق التقليدية؛ وسيلينيد نحاس الإنديوم غاليوم وتيلوريد الكادميوم، وهي طبقة من الرقائق؛ والبيروفسكايت، وهي تقنية شمسية حديثة (تمّت مناقشة هذه التقنية بالتفصيل في الفصل 6).

المصدر: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

حققت شركات القطاع الخاص في الوقت نفسه أيضًا تقدمًا مهمًّا؛ فعلى سبيل المثال، رفعت الشركات مستوى أداء ألواح السيليكون، ما أدى إلى تحسين نسبة مبيعاتها، وقدّمت آركو في عام 1982م ضمانًا لمدّة خمس سنوات لألواحها الشمسية؛ وبحلول التسعينيات كانت شركة النفط البريطانية تقدّم ضمانًا لمدة عشرين عامًا43. إن مضاعفة عمر اللوح الشمسي أربعة أضعاف ما كانت عليه في السابق، يعني أن طاقة اللوحة يمكن بيعها لسنوات عديدة، ما يسهل عملية تغطية تكاليف الألواح في نهاية المطاف. لقد كان هذا التأثير قويًّا على القدرة التنافسية للطاقة الشمسية الكهروضوئية بالقدر نفسه من القوة على زيادة كفاءة تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء.

حتى إنّه كانت هناك قصّة نجاح في مجال الطاقة الشمسية في وادي السيليكون قبل عقد من انهيار الرقائق؛ فكما يروي رائد الصناعة ديك سوانسون Dick Swanson القصّة أنّه كان مستعدًّا في عام 2001م لتسويق الألواح الشمسية السيليكونية عالية الكفاية التي طوّرتها شركته الناشئة (صن باور)، لكنّ المستثمرين لم يبدوا لسنوات عدّة أي اهتمام بتمويل الطاقة الشمسية. ولذلك كانت الشركة على وشك أن تعلن إفلاسها، وكانت تستعدّ لتسريح نصف عمالها، ثم عاود سوانسون الاتصال بزميل قديم

له في جامعة ستانفورد؛ ثورمان جون رودجرز Thorman John Rodgers، الرئيس التنفيذي لشركة سايبرس لصناعة أشباه الموصلاتCypress Semiconductor، وهي شركة تصنيع شرائح شهيرة في وادي السيليكون. عند سماع عرض سوانسون، كتب رودجرز إلى (صن باور) شيكًا شخصيًّا بمبلغ 750 ألف دولار لتفادي تسريح العمال. واصلت شركة (سايبرس) الاستحواذ على (صن باور)، حيث قدمت الخبرات الاستثمارية والتصنيعية من أجل توسيع نطاق الإنتاج، واستمرت (صن باور) حتى عام 2016م تضخّ في السوق الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون عالي الكفاءة.

من خلال البناءً على هذا التقدّم، بما في ذلك التحسينات على تقنية خلايا السيليكون في المختبرات، وتراكم الخبرات والمعدات في صناعة الطاقة الشمسية العالمية، قررت الشركات الصينية الدخول في هذا القطاع؛ فقد خرج طلاب من مختبر البروفيسور جرين، وانتشرو في جميع أنحاء الصين للبدء أو الانضمام إلى شركات الطاقة الشمسية المصنوعة من السيليكون. وقد أسّس أحد طلاب الدكتوراه السابقين، ويدعى شي زينجرونج She Zhengrong، شركة (صنتِك Suntech) التي صارت أكبر شركة مصنّعة للخلايا الشمسية في العالم44. واستمرّ طلاب آخرون من معمل جرين وعملوا مديرين تنفيذيين في كلّ منتج صيني رئيس للطاقة الشمسية. وبالإضافة إلى استيراد المعرفة التقنية، استفادت الشركات الصينية من المعدّات الأجنبية لإنشاء مصانعها. ومن أواخر القرن العشرين وحتى أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، اشترت هذه الشركات خطوط إنتاج الطاقة الشمسية الجاهزة من شركات أشباه الموصلات الأمريكية والكندية، ثم اشترت المعدّات لاحقًا من ألمانيا وكوريا الجنوبية45. ومن خلال المشاريع المشتركة مع الشركات الأجنبية، طوّرت بعض الشركات الصينية مصانعها لإنتاج ألواح شمسية ذات كفاءة عالية وطويلة العمر46. ولكنّ إسهامات الصين في الطاقة الشمسية لم تكن جميعها مستوردة من الخارج؛ فقد استثمر المنتجون الصينيون بشكل مكثّف لكي تصبح مصانعهم أكثر كفاءة من المنشآت الأجنبية، وانتزعوا كلّ فلس من سلاسل التوريد لهم.

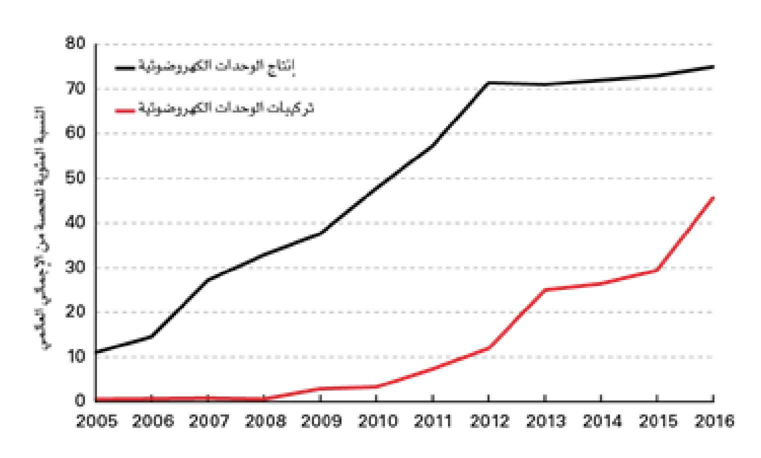
كانت الصين في عام 2005م لا تزال لاعبًا ثانويًّا في صناعة الطاقة الشمسية، حيث كانت تمثّل 11 بالمئة فقط من إنتاج الطاقة الشمسية العالمية؛ فقد عدّت الحكومة الصينية الطاقة الشمسية باهظة الثمن للاستخدام المنزلي على المستوى الداخلي، ودعمت نشرها بشكل بسيط. لكنّها أظهرت حماسها للتوسع في مجال هذه الصناعة الوليدة على مدى السنوات الخمس التي تلتها، وتدفق هذا الدعم على شكل إعانات من الحكومة المركزية وحكومات المقاطعات؛ من أجل خفض تكاليف المواد الخام، والطاقة، والأرض والمكوّنات47. واستفادت الشركات الصينية من تدفّق القروض من دون فوائد أو المنخفضة الفوائد؛ من أجل زيادة الإنتاج وتأجيل تحقيق الحكومة أرباحها48 49.

استفادت الصين أيضًا بشكل كبير من الدعم في العالم المتقدم؛ فمع ازدهار إنتاج الألواح الشمسية المحلية بين عامي 2005م و2010م، صُدِّر أكثر من 90 بالمئة من الإنتاج إلى البلدان الأوروبية في ظلّ وجود حوافز نشر سخية؛ فبالإضافة إلى التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة in-feed

tariff في ألمانيا، قدّمت كلّ من إسبانيا وإيطاليا حوافز وفيرة، ففي إسبانيا؛ غطّت الحوافز -في بعض الأحيان- نصف تكلفة تركيب الطاقة الشمسية، وبحلول عام 2009م، كانت حصّة الطاقة الشمسية من إجمالي الطاقة في إسبانيا هي الأعلى في العالم. وأنتجت الشركات الصينية بحلول عام 2010م، ما يقرب من نصف الألواح الشمسية في العالم، بِيعَ منها 6 بالمئة فقط لسوقها المحلية الراكدة50.

في ذلك الوقت ظهرتإشارات تحذيرية تفيد بأن الصين لا يمكن أن تستمر في زيادة قدرتها الصناعية المحلية على حساب العالم المتقدّم إلى أجل غير مسمّى. وقد تمكّنت الصين بفضل الإعانات الحكومية لمصانع الطاقة الشمسية المحلية، من إغراق السوق العالمية على طول سلسلة توريد الطاقة الشمسية، من البولي سيليكون الخام إلى الألواح الشمسية النهائية51. وعلاوة على ذلك، أوقفت الدول الأوروبية التي عانت الركود العظيم دعمها للطاقة الشمسية؛ فقد تراجع هدف ألمانيا لنشر الطاقة الشمسية في عام 2020م بعشرة أضعاف؛ وخفّضت إسبانيا حوافزها بمقدار النصف تقريبًا52.

دفع فائض الإنتاج وخفض الدعم منتجي الطاقة الشمسية في الصين وأماكن أخرى في العالم إلى شنّ حرب أسعار شاملة؛ للظفر بطلب العملاء القليل جدًّا، وانخفضت نتيجة لذلك أسعار اللوحات بنسبة 30 بالمئة خلال عام واحد فقط من عام 2009م إلى عام 2010م؛ ثم انخفضت مرّة أخرى بمقدار النصف بحلول عام 2013م53. واستجابة لذلك، عادت الحكومة الصينية لإنشاء سوق محلية للصناعة التي أنشأتها54. (ربما لا تكون مساعدة المنتجين المحليين هي السبب الوحيد لدفع الصين لنشر الطاقة الشمسية محليًا؛ وشملت الأسباب الأخرى رغبتها في خفض تلوّث الهواء في مدنها)، ولذلك حوّلت الصين تركيز سياساتها العامة من دعم إنتاج الألواح الشمسية إلى تمويل نشرها في البلاد. وفي عام 2013م أطاحت الصين بألمانيا بوصفها أكبر سوق للألواح الشمسية في العالم، واستحوذت بحلول عام 2016م على ما يقرب من نصف مبيعات الألواح العالمية (الشكل 2.2)55.



الشكل (2.2): حصّة الصين من إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية ونشرها. مقارنة الحصّة المحلية المتزايدة للصين من إنتاج الألواح الكهروضوئية العالمية (تُعرف الألواح أيضًا باسم "الوحدات النمطية"، وتُقاس كمّيّات الإنتاج بالجيجاواط من قدرة توليد الطاقة) مع حصّتها المحلية المتزايدة مؤخّرًا من منشآت الطاقة الشمسية الكهروضوئية العالمية (تُقاس أيضًا بـ جيجاواط من قدرة توليد الطاقة). لاحظ أنّ إحصاءات الإنتاج الصينية تشمل الإنتاج التايواني، الذي يمثّل ما يقرب من 12 بالمئة من إنتاج الألواح والخلايا الكهروضوئية الشمسية

العالمية في عام 2016م. وقد حوّلت الشركات الصينية أنشطة التصنيع الكبيرة خارج الصين، بما في ذلك تايوان وماليزيا، من أجل تجنّب تعريفات ألأمريكية والأوروبية لمكافحة إغراق السوق.
المصدر: Center for Study of Science, Technology and Policy; Fraunhofer Institute.

أدّى الانخفاض الحادّ في أسعار اللوحات إلى قلب موازين صناعة الطاقة الشمسية العالمية، وهذا لم يقضِ على محصول الشركات الناشئة في وادي السيليكون فحسب، بل قضى أيضًا على منتجي الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم المتقدّم؛ فقد تمّ تقسيم إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية بالتساوي -إلى حدّ ما- في عام 2007م، بين الصين واليابان وألمانيا وبقية العالم. وبعد عقد من الزمن كان أكثر من 80 بالمئة من إنتاج الطاقة الشمسية في آسيا، وتحديدًا في الصين56.

شهد عام 2011م على وجه الخصوص هزّة اقتصادية شلّت مُصنّعي الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة وأوروبا؛ حيث أفلس العديد من المُنتجين الأمريكيين والأوروبيين بين عامي 2010م و2012م، وأصبحوا غير قادرين على التنافس مع فيضان الألواح الصينية الرخيصة. وقد رفعت كلّ من الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي مؤخّرًا دعوى قضائية ضد الصين لانتهاكها قوانين التجارة الدولية، من خلال إغراق الأسواق العالمية بألواحها بسعر أقلّ من سعر التكلفة، لكنّ التعريفات العقابية التي فُرِضت على الواردات الصينية لإنعاش شركات الطاقة الشمسية الغربية الفاشلة، كانت قليلة ومتأخّرة للغاية.

وعانت الشركات الصينية أيضًا، فقد احتفظت بهوامش ربح سلبية في أثناء محاولتها تجاوز فائض الإنتاج، وساعد تمديد التسهيلات التمويلية بقيمة 47 مليار دولار الممنوحة من بنك التنمية الصيني خلال فترة من 2010م - 2011م، على بقاء العديد من الشركات المصنعة الصينية57. لكنّ هذه التسهيلات لم تدم طويلًا، حيث ركزت الحكومة الصينية على تقديم حوافز لنشر الطاقة الشمسية بدلًا من إنتاجها، ما تسبّب في إفلاس الشركات الصينية الكبرى أو الاندماج مع المنافسين. على سبيل المثال أفلست في عام 2013م شركة (صنتِك) التي كانت في يوم من الأيام أكبر منتج للطاقة الشمسية في العالم58. وعند انتهاء صراع الصناعة العالمية على الطاقة الشمسية، برزت الصين بوصفها أكبر منتج ومستهلك في العالم للطاقة الشمسية الكهروضوئية التي كان معظمها مصنوع من السيليكون. ومن غير المرجّح أن يتمّ تحدّي هذه الهيمنة في أيّ وقت قريب.

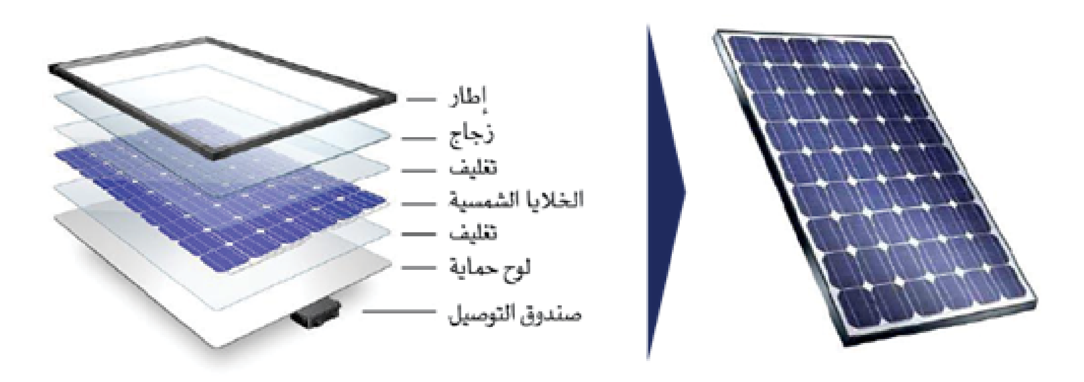
واقع نمو الصناعة

بعد أن بلغت صناعة الطاقة الشمسية النضج الآن، باتت تستعد لمواصلة النمو بشكل سريع، إلا أنّ الشركات تحرص في مواجهة الانخفاض المتسارع للتكاليف وانخفاض الإعانات العامة، على الاستمرار صامدة بينما تتوسّع بسرعة كافية لمواكبة نمو السوق العالمية. وتشير هذه الديناميكية إلى

أنّ الهيكل الأساسي للصناعة يجب أن يظلّ مستقرًّا نسبيًّا؛ لأنّ الشركات تقوم باستثمارات ضئيلة في هذه التقنيات الثورية. (انظر الجدول (2.1) للحصول على نظرة عامة على المصطلحات والمفاهيم المستخدمة في صناعة الطاقة الشمسية اليوم.

الجدول (2.1): مبادئ الطاقة الكهروضوئية الشمسية

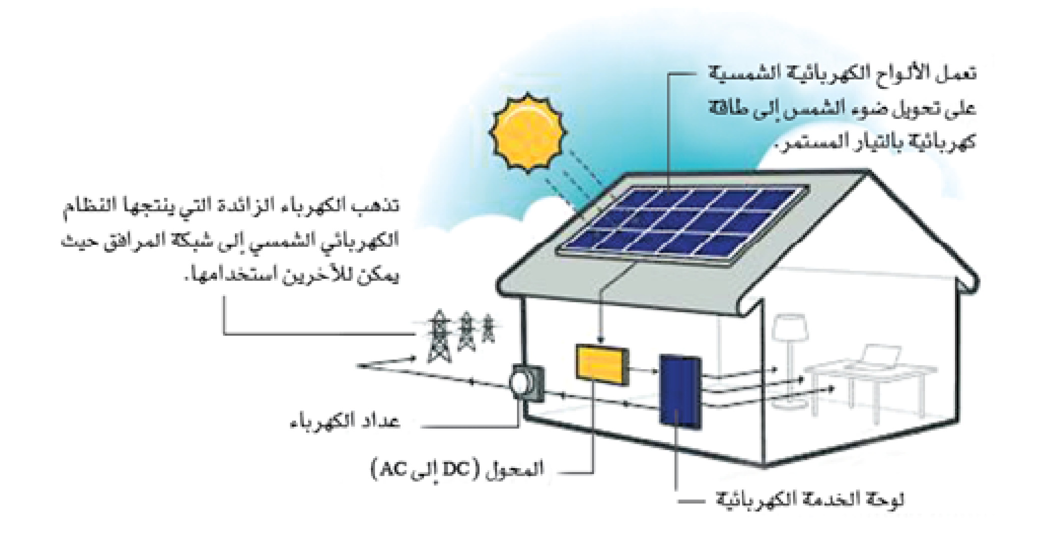
في قلب نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية، توجد الألواح الشمسية (يشار إليها أيضًا في الصناعة بوصفها وحدة شمسية). يوضّح الشكل (2.3) مكوّنات الألواح الشمسية؛ حيث تقع بين طبقات الزجاج والبوليمرات مجموعة من الخلايا الشمسية التي عادة ما تكون مصنوعة من السيليكون، وتحوّل جزيئات ضوء الشمس إلى كهرباء.



الشكل (2.3): نموذج لمكوّنات الألواح الشمسية الكهروضوئية.

المصدر: DuPont.

كما يصوّر الشكل (2.4) نموذجًا لنظام شمسي للمنازل؛ حيث تمتصّ الألواح الشمسية المركبة على الأسطح ضوء الشمس، وتحوّله إلى تيار كهربائي مباشر (ويعرف باسم DC). ومع ذلك، نظرًا إلى أنّ الأجهزة المنزلية تعمل على تيار كهربائي متردّد (ويعرف باسم AC)، فإنّ الطاقة المنتجة من الألواح الشمسية تمرّ عبر جهاز يسمّى محوّل التيار الذي يغيّر التيار المستمر إلى التيار المتردّد، وبعد ذلك تستطيع كهرباء التيار المتردّد تشغيل الأجهزة في المنزل، وإذا توافر فائض من الكهرباء الذي تنتجه الألواح الشمسية أكثر مما يحتاجه المنزل في وقت من الأوقات، فيمكن بيعه للشبكة الرئيسة.



الشكل :(2.4) كيف يتصل نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية السكنية بالشبكة؟

المصدر. New York State Energy Research and Development Agency :

تعرف كمّيّة الطاقة التي يمكن أن تنتجها الألواح الشمسية في الثانية عندما تكون الشمس عمودية؛ بالقدرة على توليد الطاقة الكهربائية، وتقاس بالواط (W) من الطاقة الكهربائية المستهلكة. عادة يمكن أن تنتج اللوحة ألواحدة ما بين 350-250 واط، ويقدّر متوسّط النظام الشمسي المنزلي في الولايات المتحدة بـ 5000 واط تقريبًا، أو 5 كيلوواط [.(kW)ملاحظة: ميغاواط واحدة (MW) تعادل مليون واط، وتعادل الجيجاواط 1 بليون واط.] وتشكل الأنظمة المنزلية أحد استخدامات الطاقة الشمسية، كما يوضّح الشكل (2.5)، توجد أربعة أنظمة رئيسة لتوليد الطاقة الشمسية:

.1 نظام الطاقة الشمسية الخاصّ بمحطات توليد الطاقة التي تنتج مئات الميجاوات من الطاقة الكهربائية.

.2 نظام الطاقة الشمسية الخاصّ بالمنشآت التجارية والصناعية التي عادة ما تكون أقلّ من 2 ميجاوات.

.3 نظام الطاقة الشمسية المنزلية التي عادة ما تكون أقلّ من 50 كيلو واط.

.4 نظام الطاقة الشمسية خارج الشبكة، التي يتم نشرها حيث لا تصل شبكة الطاقة المركزية، صغيرة مثل لوحة واحدة.



الشكل :(2.5) خطوط الإنتاج الأولية للطاقة الشمسية الكهروضوئية والأسواق النهائية.

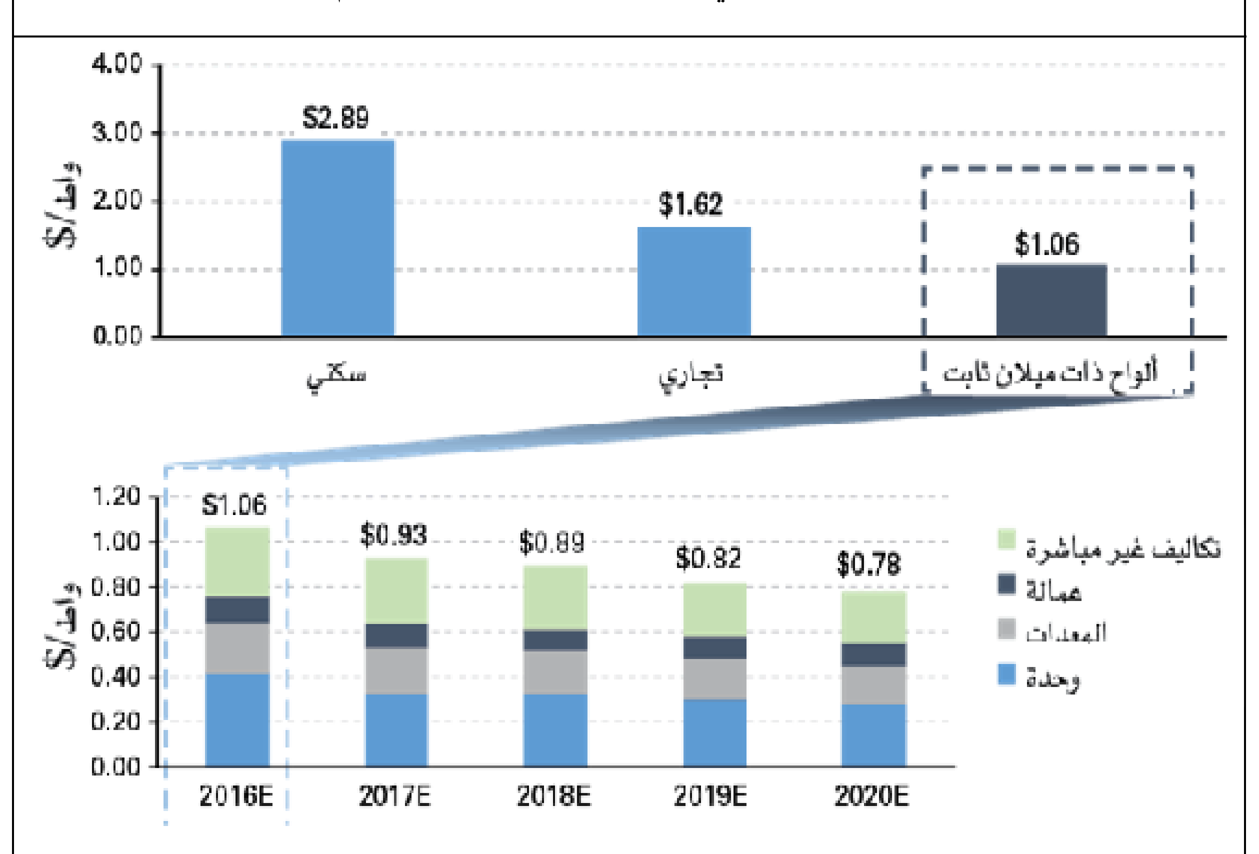
المصدر: صور من .Wikimedia Commons

وكما يوضّح الشكل (2.5)، يمكن تقسيم قطاع الطاقة الشمسية بين خطوط الإنتاج الأولية (المنبع) ومرحلة التوزيع النهائية (المصب) للألواح الشمسية في هذه الأسواق الأربعة؛ حيث يبدأ تصنيع الألواح الشمسية بتعدين البولي سيليكون وتكريره، ثم يُصهَر إلى سبائك أسطوانية طويلة وتُقطّع إلى شرائح رقيقة، وبعد ذلك تُحوَّل هذه الرقائق المصنوعة من السيليكون عالي النقاء إلى خلايا شمسية، التي تحوِّل جزيئات ضوء الشمس إلى كهرباء. أخيرًا، تُجمَع الخلايا الشمسية وتُركَّب معًا في لوحة شمسية وتُعزَل بإحكام.

تشمل صناعة الطاقة الشمسية مجموعة متنوّعة من الشركات. ومن إحدى الفئات المهمّة المنتجون الأساسيون (وتُسمّى أيضًا الشركات المصنّعة، التبادلية) والنهائيون الذين ينتجون المعدّات والمكوّنات والألواح الطاقة الشمسية، وتوجد أيضًا فئة أخرى وهي مطوّرو المواد الأولية الذين يرعون مشروع الطاقة الشمسية من خلال مراحل مختلفة من التصميم والتمويل والبناء والتشغيل. تقوم بعض الشركات المتكاملة عموديًا بتنفيذ خطوات تصنيع أولية متعدّدة ولديها أقسام تنشر الألواح الشمسية في الأسواق النهائية أيضًا.

انخفضت في السنوات الأخيرة تكلفة الطاقة الشمسية بشكل كبير، ويبدو أنّها ستستمرّ في الانخفاض حيث إنّ من أسهل الطرق لقياس التكلفة هي تقسيم التكلفة الأولية لتركيب الطاقة الشمسية على سعتها المقدّرة بالواط. يوضّح الشكل (2.6) في الرسم البياني العلوي التكلفة لكلّ واط من تركيبات الطاقة

الشمسية في الولايات المتحدة (باستثناء أيّ إعانات حكومية)؛ فكلّما زاد حجم التركيب الشمسي، انخفضت التكلفة لكلّ واط، ويعود الفضل في ذلك جزئيًّا إلى وفورات الحجم.



الشكل :(2.6) انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. تستثني التوقعات التعريفات الأمريكية المحتملة لعام 2018م.

المصدر.: GTM Research (2017)

يركّز الرسم البياني السفلي على أرخص شريحة -المنتجة في محطات الطاقة الشمسية- ثم تُقسَّم التكاليف المتوقّعة حتى عام 2020م. ومن المتوقع بحلول نهاية العقد أن تكون تكلفة تركيب الطاقة الشمسية في المحطات أقلّ من دولار واحد/واط، وستشكل الألواح الشمسية أقلّ من نصف التكلفة الإجمالية. وستحسب بقية التكلفة من الأجهزة المرتبطة؛ مثل المحوّلات التي تربط الألواح بالشبكة، والإلكترونيات، ونظام التركيب، بالإضافة إلى تكاليف العمالة والتكاليف الأخرى المتعلقة بالتسهيلات، مثل تأمين التصاريح والتمويل59.

ومع ذلك، فإن إحتساب تكلفة حمل الواط ليس مقياسًا مفيدًا لتقييم القيمة التنافسية للطاقة الشمسية، ففي حين أنّ محطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري يمكن أن تنتج الطاقة بكامل طاقتها إلى أجل غير مسمّىً، تستطيع الألواح الشمسية أن تنتج ما يقرب من قوتها الكهربائية المقدرة فقط في وقت الظهيرة حين يصل ضوء الشمس ذروته. ونظرًا إلى أنّ ضوء الشمس في المتوسط يكون أقّل بكثير على مدار اليوم، فإنّ التركيبات الشمسية تنتج طاقة أقلّ بكثير في المتوسط من طاقتها الاستيعابية. وينتج النظام

الشمسي المنزلي في الولايات المتحدة -عادةً- خمس الطاقة فقط على مدار عام، وذلك في حال استمرار إنتاج الطاقة وفقًا لقدرتها المصنفة. ومن الممكن أن يرتفع هذا الرقم إلى أكثر من الثلث بالنسبة إلى بعض أنظمة نطاق المرافق إذا كانت ألواحها الشمسية مزوّدة بأجهزة تتبّع أحادية المحور، التي تتتبّع الشمس في أثناء تحرّكها على مدار اليوم، وقد صار المطوّرون يفضّلون هذا النمط بشكل متزايد.
توجد طريقة أفضل لتقييم تكاليف الطاقة الشمسية، وهي مقارنة تكلفة الطاقة الكهربائية التي تنتجها بتكلفة كمّيّة الطاقة نفسها من مصادر أخرى. وتُقاس الطاقة الكهربائية بالكيلوواط/ساعة (kWh)؛ أي كيلوواط من الطاقة المُنتجة لمدّة ساعة واحدة]أي مقدار 1,000kWh إلى ميغاواط/ساعة (MWh)[؛ حيث تُحتسب هذه التكلفة، وتُوزَّع التكلفة الأولية لتركيب الألواح الشمسية على الطاقة التي ينتجها على المدّة العمرية، مع مراعاة القيمة الزمنية للنقود. حسب بنك الاستثمار Lazard فإنّ تكلفة محطات الطاقة الشمسية في بعض الحالات كانت أقلّ من 50 دولارًا لكلّ ميجاوات في الساعة في عام 2016م، مقارنة بتكلفة الكهرباء الناتجة من أرخص وقود أحفوري (الغاز الطبيعي). ومع ذلك، وكما يوضّح الفصل الثالث، فحتى التكلفة المنخفضة للكيلوواط / ساعة، يمكن أن تفشل في جعل الطاقة الشمسية قادرة على المنافسة في حال تجاوزت تكلفة الطاقة الشمسية القيمة التي توفّرها.

خلال جميع الاضطرابات والإفلاسات وتقلبات الأسعار التي حصلت في العقود الأخيرة، نمت سوق الطاقة الشمسية وصناعتها بشكل مستمر ومتسارع؛ فعلى مدار العقدين السابقين وحتى عام 2016م، نما الإنتاج العالمي السنوي من الخلايا الكهروضوئية بوتيرة سنوية بلغت قرابة 40 بالمئة؛ حيث توفّر الطاقة الشمسية الآن أكثر من 2٪ من الطلب العالمي على الكهرباء. وعلى الرغم من التقلبات قصيرة الأجل، إلا أن تكاليف الألواح الشمسية ظلت تنخفض بانتظام على المدى البعيد مع ارتفاع إجمالي إنتاج الطاقة الشمسية- أي بنحو 20 بالمئة لكلّ ضعف من الإنتاج التراكمي61 . أُطلق على هذا التخفيض المنتظم اسم "قانون سوانسون Swanson’s Law" (على الرغم من أن ديك سوانسون؛ مؤسس صن باور، كان يقول لمن يريد أن يسمعه إن بول مايكوك في وزارة الطاقة الأمريكية هو الذي لاحظ هذا الاتجاه أولًا، وعمّمه سوانسون لاحقًا).

عندما كان البروفيسور جرين ينتج تصميمات جديدة ومحسّنة للخلايا الشمسية بين عامي 1980–2001م، أدّت التحسينات في كفاءة الطاقة الكهروضوئية إلى انخفاض التكلفة، ولكن التحسينات التي تساعد في رفع الأداء أدّت منذ ذلك الحين إلى إيقاف استمرارية انخفاض التكاليف. وبدلاً من ذلك، حدثت هذه الانخفاضات لأنّ الشركات استطاعت رفع مستوى العوائد من خلال رفع كثافة الإنتاج، وتعلمت بذلك انتزاع التكاليف من عمليات التصنيع وسلسلة التوريد62. أضف إلى ذلك أنّ تكاليف نشر الآلاف من الألواح الشمسية في الصحراء أو عشرات منها على الأسطح انخفضت أيضًا بشكل منتظم، حيث اكتسب مسؤولو التركيب والمطوّرون في جميع أنحاء العالم الخبرة، وابتكروا طرقًا

ذكية لتركيب الطاقة الشمسية بتكلفة أقلّ. مع انتشار استخدام الطاقة الشمسية، يفترض أن تستمر هذه التوجهات في الإسهام في خفض تكلفة تثبيت ألواح الطاقة الشمسية.

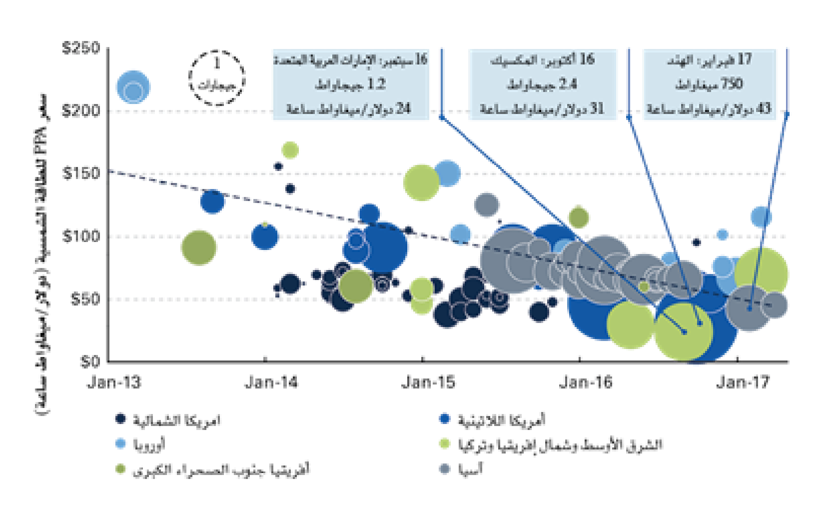
في الوقت ذاته، أصبحت المنافسة أكثر شراسة عبر سلسلة القيمة الإنتاجية للطاقة الشمسية بأكملها؛ فقد كانت القطاعات الأكثر ربحية في صناعة الطاقة الشمسية هي خطوط الإنتاج الأولية في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، وخاصة في إنتاج البولي سيليكون. ولكنّ أسعار هذه المنتجات جميعها تراجعت عندما حدثت وفرة في المصانع الصينية التي تنتج البولي سيليكون والخلايا والألواح عبر الإنترنت، ما أدّى إلى تقليص الأرباح خارج سلسلة القيمة الأولية بأكملها63.

تُقلَّصت الآن أيضًا أرباح الشركات في نشر الطاقة الشمسية، ويرجع ذلك جزئيًّا إلى اشتداد المنافسة وإلى الانخفاض العالمي في المدفوعات التحفيزية للطاقة الشمسية؛ فقد دعمت الحكومات منذ القدم نشر الطاقة الشمسية بثلاث طرق رئيسة، هي: أولًا، فرضت على محطات توليد الطاقة أخذ حصّة معيّنة من طاقتها من مصادر متجدّدة مثل الطاقة الشمسية. ثانيًا، دعمت بناء منشآت الطاقة الشمسية؛ على سبيل المثال، من خلال الإعفاءات الضريبية التي تقلّل التكلفة الأولية للطاقة الشمسية. وثالثًا، دفعت مقابل الطاقة التي تنتجها الطاقة الشمسية بسعر أعلى شريحة استهلاكية؛ على سبيل المثال، من خلال تعريفات التغذية أو سياسة أخرى تُعرف باسم "صافي القياس"، وهو نظام بيع المنازل والشركات فائض الطاقة للشبكة، غالبًا بمعدلات أعلى مما قد تجلبه الطاقة في السوق المفتوحة.

كانت التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة feed-tariff in على وجه الخصوص أساسية لتحفيز نشر الطاقة الشمسية، وقد صارت في عام 2015م، من إحدى السياسات الشائعة لتعزيز الطاقة المتجدّدة في العالم64. لكن بعض الدول حول العالم أخذت تستبدل التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة feed-tariff in، (التي تضمن لمورّدي الكهرباء الشمسية المدفوعات المرتفعة نفسها)؛ بالمزادات العكسية حيث يتنافس المطورون بعضهم مع بعض لتقديم أقلّ سعر يوافقون عليه، وتُباع على أساسه الطاقة الشمسية لمدّة من خمس عشرة إلى عشرين سنة قادمة. أدّى التحوّل في السياسة من خلال رفع مستوى التنافس بين الشركات، إلى خفض كبير في سعر العقد الذي يمكن للمطوّرين بيع الطاقة من خلاله، ما أدى إلى تقليص أرباحهم65. وحتى ألمانيا، التي كانت رائدة في التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة feed-tariff in، تحوّلت إلى المزادات العكسية، وهو أمر حكيم من الناحية المالية بالنسبة إليها، لكنها كارثية على هوامش ربح مطوّري الطاقة الشمسية.

وحتى مع تقلّص الأرباح عبر سلسلة قيمة الطاقة الشمسية، لم تكن الآفاق العالمية لنشر الطاقة الشمسية في كل أنحاء العالم أقوى من أيّ وقت مضى، فقد شجّعت سلسلة الأسعار المنخفضة -قياسيًّا- لمشاريع الطاقة الشمسية حول العالم، الحكومات على تحديد أهداف نشر أكثر طموحًا من أيّ وقت مضى. بدأت دورة الأسعار الرخيصة من دبي في عام 2015، مع عرض لم يسبق له مثيل من قبل مطوّر سعودي لبناء مشروع للطاقة وبيعها مقابل 6 سنتات لكلّ كيلو واط/ساعة (kWh). ثم أدّت المناقصات الحكومية اللاحقة في بيرو والمكسيك وتشيلي إلى خفض الأسعار إلى أقلّ من 3 سنتات /

كيلوواط ساعة. في أواخر عام 2016م حصلت أبوظبي على لقب أرخص أنواع الطاقة الشمسية عند 2.4 سنت/ كيلوواط ساعة (الشكل 2.7)66، لكن المملكة العربية السعودية فازت في أواخر عام 2017م بتاج أرخص أنواع الطاقة الشمسية بسعر 1.79 سنت/ كيلوواط ساعة (ربما بمساعدة الحوافز).

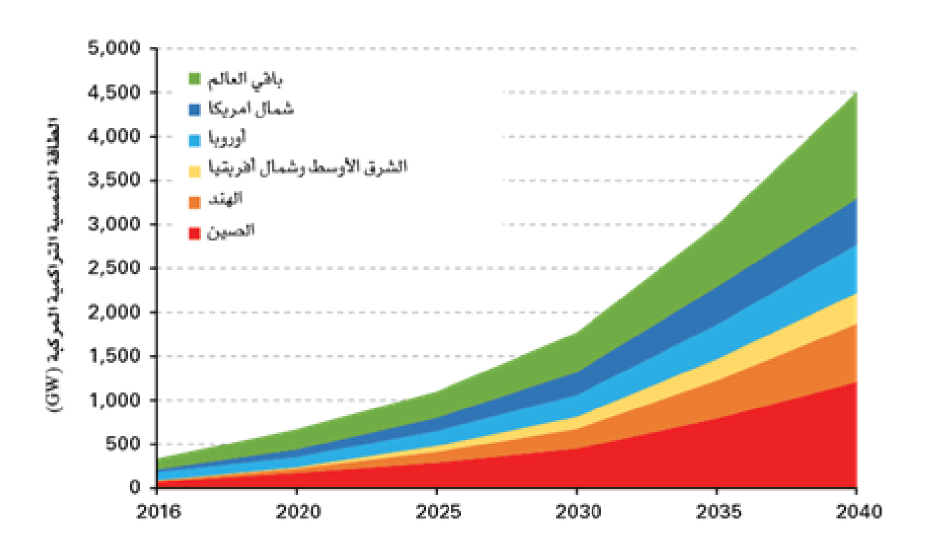


الشكل (2.7): الأسعار الأخيرة لاتفاقيات شراء الطاقة الشمسية الكهروضوئية حول العالم. وتمثّل كلّ دائرة السعر الذي وافق عليه مطوّر مشروع محطات الطاقة الشمسية لبيع الكهرباء من خلال عقد اتفاقية شراء الطاقة مع أحد العملاء (على سبيل المثال، أن يشتري الكهرباء ويوزّعها على المنازل والشركات). يمثّل حجم كلّ دائرة قدرة توليد الطاقة (بالميجاوات أو الجيجاوات) لتلك المنشأة الشمسية المحدّدة. يشير تظليل كلّ دائرة إلى منطقة العالم التي تمّ فيها إنشاء المشروع أو سيتمّ بناؤه فيه. يقترب الخط المتقطع من متوسط الاتجاه التنازلي لأسعار اتفاقيات شراء الطاقة الشمسية الكهروضوئية بمرور الوقت.

المصدر: GTM Research (2017).

إدراكًا منهم لانخفاض التكلفة المستمر، كان محللو السوق متفائلين بشأن آفاق نشر الطاقة الشمسية في كلّ قارة باستثناء القارة القطبية الجنوبية؛ حيث تتوقّع شركة بلومبرج لتمويل الطاقة الجديدة Bloomberg New Energy Finance أنّ تكلفة الطاقة الشمسية الكهروضوئية ستنخفض بمقدار الثلثين بحلول عام 2040م؛ وعليه، ستشكل الطاقة الشمسية 17 بالمئة من إجمالي توليد الكهرباء (انظر الشكل 2.8). سيكون هذا الأمر مدهشًا بشكل خاصّ؛ لأنّ من المتوقع أن ينمو الطلب على الكهرباء بسرعة في الأسواق الناشئة، بقيادة التوسّع الحضري والنمو الاقتصادي، وبظهور مصادر جديدة للطلب مثل السيارات الكهربائية. وإذا تحققّت توقّعات بلومبيرج بالفعل، فإنّ الطاقة الشمسية ستنمو بأكثر من 1500٪ في عام 2040م، وسيحدث أكثر من 40٪ من هذا النمو في الصين والهند التي تتأهب للتوسّع في نشر الطاقة الشمسية الكهروضوئية بشكل لا مثيل له. إنّ اللافت للنظر هو أنّ هذه التركيبات ستكون بالأحجام جميعها، وليس فقط في شكل حقول شمسية ضخمة. ومن المتوقّع أن تتفكّك الطاقة الشمسية البالغة 4500 جيجاوات في عام 2040م، بنسبة 70-30 بين حقول الطاقة

الشمسية ومحطات الطاقة والمنشآت الشمسية الموزّعة التي تمتد خارج الشبكة وأسطح المنازل السكنية والتجارية67.



الشكل (2.8): توقّعات لنشر الطاقة الشمسية حول العالم. يبيّن هذا الرسم البياني النمو المتوقّع في قدرة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المركبة (تقاس بالجيجاوات) في البلدان والمناطق الرئيسة حول العالم بين عامي 2016م و2040م.

المصدر: Bloomberg New Energy Finance (2017).

ومع ذلك، غرس شحّ الأرباح والاضطراب الأخير في الصناعة في الشركات نهجًا محافظًا ومنخفض المخاطر تجاه المستقبل؛ حيث إنّ صناعة الطاقة الشمسية اليوم -في الواقع- بعيدة كلّ البعد عن الرؤية التي أقنعني بها مارتن روشيزنMartin Roscheisen عندما وضع ذراعه على كتفي في شركة نانو سولار، وتحدّث بحماسة عن الثورة التقنية القادمة. لكن بالكاد يوجد اليوم استثمار للمواد الشمسية التي تتجه إلى ما بعد السيليكون، فهيكل هيكل الصناعة الحالية يتبلور حول السيليكون، ويركّز منتجو البولي سيليكون على رفع درجة نقائه. ويحرص مصنّعو السبائك المعدنية والرقاقات أيضًا على عدم التخلّص من المواد غير المستخدمة؛ لأنّها تزوّد مُصنّعي الألواح الشمسية برقاقات سيليكون رفيعة بشكل متزايد. أضف إلى ذلك أنّ مُصنّعي الخلايا واللوحات يهدفون إلى زيادة فاعلية منتجاتهم مع تقليل تكلفة المواد وعمليات التصنيع المتعلقة بالإنتاج.

يركّز مطوّرو وممولو منشآت الطاقة الشمسية في المراحل النهائية على تحقيق أهداف التكلفة المنخفضة في تقنية السيليكون الحالية فقط التي فُحِصت بدقّة. وتروّج جمعيات صناعة الطاقة الشمسية في خريطة الطريق الخاصّة بها من أجل تحقيق رفع مستوى كفاءة الألواح الشمسية بشكل تصاعدي وثابت بوصفه دليلًا على الحماس الابتكاري في الصناعة68. لكن الحقيقة هي أنّ متوسّط كفاءة الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون سيزداد كلّ عام على مدى العقد المقبل في حال تحوّل

المزيد من المنتجين من السيليكون المنخفض النقاء إلى عالي النقاء، وإلى هياكل الخلايا الضوئية الأكثر فاعلية التي اختُرعت بالفعل.

من المؤكد أنّ الصناعة ستستمر في رؤية الابتكار المتزايد؛ حيث إنّ محوّلات التيار (التي تربط الألواح الشمسية بالشبكة) ستكون أكثر ذكاءً وأقلّ تكلفة، وسيبتكر مطوّرو المشاريع طرقًا بارعة لكيفية تخطيط الألواح الشمسية وتركيبها لتقليل تكاليف الأسلاك والفقد الكهربائي، كما تستخدم الشركات طائرات من دون طيار لمراقبة عمليات مزارع الطاقة الشمسية جوًّا، ولخفض تكاليف العمالة في الوقت نفسه.

إلا أنّ الصناعة لا تزال تنفق في المتوسّط 1٪ فقط من إيراداتها السنوية على البحث والتطوير، وهذا يُعدّ مبلغًا ضئيلًا مقارنة بمعظم الصناعات المتقدّمة. وقد أفاد باحثون من جامعة ستانفورد في عام 2017م، أنّ شركات الطاقة الشمسية الصينية بدأت في إنفاق المزيد على التعاون في مجال البحث والتطوير مع الباحثين الغربيين، والدخول في شراكة مع الحكومة الصينية من أجل الاستثمار في التقنيات الحديثة. ولكنّ معظم نفقات البحث والتطوير الخاصّة بهذه الشركات لا تزال تستهدف التحسين التدريجي لتقنية السيليكون الحالية. ولا تُعدّ التقنية الإحلالية أو المسببة للاضطراب طموح معظم الشركات الصينية؛ التي فضلت بدلًا من ذلك اللجوء إلى الاندماج الرأسي أو الأفقي للوصول إلى مركز أفضل في السوق69.

من الواضح بعد أن فازت الصين والسيليكون في المنافسة، أن صناعة الطاقة الشمسية تخطط للابتعاد عن الابتكار المزعزع disruptive innovation؛ فالصناعة قد بلغت مرحلة النضج، ومع ذلك، فإن ندرة الابتكار مقلقة للغاية لأيّ شخص يأمل في مستقبل للطاقة الشمسية.



الفصل الثالث حجب الشمس

في الساعة 9:45 من صباح يوم 20 مارس 2015، نظر مشغلو شبكة الكهرباء في ألمانيا إلى السماء آملين بقدوم السحب. لكن لخيبة أملهم، كانت السماء صافية وكان القمر يتجه نحو الشمس بعناد. كانت الألواح الشمسية في أنحاء البلاد جميعها تضخّ الكهرباء بسبب الطقس الجيد، ولكن على مدار الساعتين القادمتين، فإنّ أكثر من 70٪ من منشآت الطاقة الشمسية في ألمانيا، التي توفّر عادةً ربع الطاقة القصوى في وقت الذروة في النهار، ستتوقّف بسبب كسوف كلّي قبل أن تعود هذه المنشئات إلى العمل مرة أخرى1. في هذه الأثناء، تأهب مشغّلو شبكة الكهرباءللحفاظ على إمداد ثابت للكهرباء في جميع أنحاء البلاد وتجنّب انقطاع التيار الكهربائي.

لم يكن من المفترض أن يكون الأمر على هذا النحو، ففي إيطاليا، عندما ارتفع مستوى الطاقة الشمسية في السنوات الأخيرة، فصل المشغّلون هناك جميع منشئات الطاقة الشمسية الرئيسة عن الشبكة قبل حدوث الكسوف، لمنع الفقد والارتفاع اللاحق للطاقة الشمسية من التسبب في خراب الشبكة. لكن ألمانيا كانت مصمّمة على مواجهة الكسوف، لأن ترك أسطولها الضخم من الطاقة الشمسية مستمرًا في العمل سيمثّل اختبارًا مصيريًا لشركة إينيرجيفنده Energiewend. ولذلك، وبالدقّة الألمانية المعهودة، استعدّ مشغلو الشبكة لأشهر لحشد كل طرق توليد الكهرباء - الفحم، والغاز الطبيعي، والكتلة الأحيائية، ومحطات الطاقة النووية والكهرومائية واستطاعوا بذلك تجميع أسطول احتياطي بضعف القدرة الاحتياطية العادية، وقاموا بتنسيق الخطط مع الدول المجاورة؛ حتى تتمكّن ألمانيا من الاعتماد على الموارد خارج حدودها لتعويض الانخفاض المفاجئ في إنتاج الطاقة الشمسية2،3.

كان مشغلو الشبكة الألمان يحتفلون بعد ساعتين، فقد نجحت استعداداتهم، وظلت الشبكة تعمل خلال الكسوف من دون أن يشعر المستهلكون بأيّ انقطاع. وبنشوة النصر، غرّدت شركة TenneT (التي تدير جزءًا من شبكة كهرباء جنوب ألمانيا وسجلت أعلى نسبة في توليد الطاقة الشمسية): " إنيرجيفيند: 1، وكسوف الشمس: 0"4، وأشادت وسائل الإعلام حول العالم بنجاح ألمانيا بوصفها الرائدة في مجال الطاقة الشمسية والتحوّل السلس إلى الطاقة النظيفة.

لكنّ القليل منهم هو مَن لاحظ التعليق المهم لرئيس نظام التحكم في TenneT بيتر هوفمان Peter Hoffman، الذي كان عليه إدارة الشبكة، بعد مدة من انتهاء احتفال وسائل الإعلام بانتصار ألمانيا على الكسوف؛ عندما قال وهو يحدق في كرة بلورية: "ما نراه على أنه أزمة [اليوم] سيكون ظاهرة يومية في غضون 10 سنوات"5.

والسبب فيما قاله هو لأنه سيجري إنتاج المزيد من الطاقة الشمسية في المستقبل، ما سيجلب معه تقلبات شديدة في إنتاج الطاقة وقد يزيد من خطر انقطاع التيار الكهربائي؛ فقد كان في ألمانيا في عام 2016م عدد كافٍ من الألواح الكهروضوئية الشمسية لتزويدها بربع حاجتها من الطاقة في حال شُغِّلت الألواح بكامل طاقتها في وقت واحد، ولكن إذا أخذنا في الحسبان أوقات معيّنة من النهار قد تُنتَج فيها كمّيّة قليلة من الطاقة الشمسية وأوقات أخرى لا تُنتَج فيها الطاقة إطلاقًا، فإنّ الألواح الشمسية تمثّل أقلّ من 7٪ من الكهرباء السنوية في ألمانيا. ويتطلّع السياسيون الألمان إلى زيادة حصّة الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية الكهروضوئية في المستقبل إلى أكثر من أربعة أضعاف، لتصل بذلك إلى 30٪ بحلول منتصف القرن الحالي6، وستؤدّي هذه الزيادة إلى تقلبات فورية وهائلة في إمدادات الطاقة إلى الشبكة مثل تقلبات الطقس.

من شأن هذا التقلب أن يؤكد توقّعات هوفمان المتشائمة بأنّ أزمة اليوم قد تكون شائعة مستقبلًا؛ فإذا كان من المفترض أن تزوّد الطاقة الشمسية ألمانيا في المستقبل بما يقارب ثلث حاجتها من الكهرباء على مدار العام، فإنّ ذلك يعني أنّ عليها حساب مقدار الطاقة الفعلية التي تستطيع جمعها في معظم أوقات الظهيرة المشمسة، فمن شأن السحب المفاجئة في هذه الحالة أن تعرقل تدفّق الكهرباء إلى الشبكة أكثر بكثير مما فعله كسوف عام 2015م. ومع أنه كان أمام مشغّلي الشبكات في ألمانيا شهور للاستعداد لكسوف عام 2015م، إلا أنه كان يتعين عليهم الاستجابة للغيوم في غضون ساعات، إن لم يكن في دقائق. لذلك، يجب أن تكون الاستعدادات المكثفة التي استغرقتها ألمانيا لتمر بسلام خلال الكسوف علامة تحذير على أنّ إدارة زيادة الطاقة الشمسية قد تكون باهظة بالنسبة لمنشئات توليد الكهرباء ومحفوفة بالمخاطر.

إذا ما نظرنا إلى مرحلة ما بعد انتصار ألمانيا اللحظي على الكسوف، فإنّ تكاليف الحصّة المتزايدة للطاقة المتجدّدة أصبحت في بؤرة الاهتمام؛ فنظرًا لدخول المزيد والمزيد من مولّدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى الساحة، فقد قلب إنتاجها أسواق الطاقة رأسًا على عقب، ما أدّى إلى تحطيم الأسعار التي يمكن لشركات الطاقة أن تبيع بها الكهرباء للشبكة وهذا ما يضع ضغوطًا مالية على تلك الشركات التي تمتلك محطات تعمل على الطاقة النووية والوقود الأحفوري. وللتعويض عن تقلّبات الطاقة المتجدّدة، استثمرت ألمانيا في أسطول من المحطات الاحتياطية باهظة الثمن للحفاظ على استقرار الشبكة7. وسوف يكون على المستهلين أن يدفعوا فاتورة عالية على مدى السنوات الخمس المقبلة؛ لأنّ ألمانيا تستثمر 20 مليار دولار في بناء خطوط نقل التيار، وتحديث شبكات التوزيع المحلية، وتركيب تقنية الشبكات الذكية؛ من أجل استيعاب المزيد من الطاقة المتجدّدة8.

ونظرًا إلى تميّز ألمانيا في مجال شبكة الكهرباء وقدرتها على الاستثمار في تطويرها، فإنّها في وضع أفضل من الدول الأقلّ ثراءً مثل الهند، في مواجهة التحدّيات الكامنة في الزيادة السريعة للطاقة الشمسية. ومع ذلك، ستواجه البلدان الغنية والفقيرة تكاليف باهضة ومعقّدة في حال سعت إلى

زيادة مستويات الطاقة الشمسية لديها. ولكن ليس أمامهم إلا المحاولة؛ إذ من المرجح أن يحتاج العالم إلى الطاقة الشمسية لتوفير ما لا يقلّ عن ثلث الكهرباء بحلول منتصف القرن الحالي للحدّ من تغيّر المناخ الكارثي، وسيؤدّي هذا التوسّع إلى تحدّيات أكثر صعوبة من الماضي.

وقد بدأت العديد من دول العالم في التخلي فعلاً عن نماذج تمويل الطاقة الشمسية المدعومة، مثل التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة in tariff-feed في السنوات الأولى من تأسيس شركة إنيرجيفند في ألمانيا. وسيتعيّن عليها، بدلًا من ذلك، استدراج رؤوس أموال كبيرة من القطاع الخاص لتكثيف نشر الطاقة الشمسية. لكن المشكلة هي أنّ أكبر المستثمرين في العالم لا يزالون يتجاهلون الطاقة الشمسية حتى الآن، وقد يتوقف تقدّم الطاقة الشمسية إذا لم يستثمروا في هذا المجال.

وحتى لو أدت زيادة الاستثمار إلى تسريع بناء طاقة شمسية جديدة، فإنّ ارتفاع الطاقة الشمسية الكهروضوئية قد يكون سببًا في تراجع هذا الاستثمار، فمع انخفاض تكلفة توليد الطاقة الشمسية بشكل مطرد، فمن الممكن أن يؤدّي إلى خفض قيمة استهلاك تلك الكهرباء بشكل أسرع مع ربط المزيد منها بالشبكة. ويمكن أن تنخفض القيمة لأنّ الألواح الشمسية الإضافية ستتسبّب بوجود فائض في الطاقة في منتصف اليوم، إضافة إلى أنّ المستويات العالية من الطاقة الشمسية ستجهد شبكات الطاقة في جميع أنحاء العالم، ما يتطلب حلولًا مكلفة. ويمكن لما يسمى "الانكماش في القيمة value deflation" أن يخفض قيمة الطاقة الشمسية إلى ما دون التكلفة المنخفضة لإنتاجها، ومن ثم تقوّض الفوائد الاقتصادية التي تساعد في التوسع في نشر المزيد من الطاقة الشمسية. وبعد ذلك ستتحوّل الجاذبية الاقتصادية الحالية للطاقة الشمسية إلى مجرد وهم، وهو مؤشّر ضعيف لتوقّعات مستقبل الطاقة الشمسية.

يوفر الابتكار مجالًا للمضي قدمًا. وكما يوضّح الجدول (3.1) أدناه، فإنّ الابتكار يأتي في أشكال مختلفة؛ إذ يمكن للنماذج المالية والتجارية الابتكارية أن تجتذب رساميل ضخمة لمواصلة نشر الطاقة الشمسية حول العالم خلال العقد أو العقدين المقبلين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للابتكار التقني أن يخفّض تكلفة الطاقة الشمسية بسرعة أكبر بكثير عما كانت عليه، ما يسمح للطاقة الشمسية بأن تظلّ قادرة على المنافسة حتى مع انخفاض قيمتها. أخيرًا، يمكن للابتكار الأوسع والمنتظم أن يعزّز القيمة التي توفرها الطاقة الشمسية. بوجه عام، تستطيع الأنواع الثلاثة من الابتكار حماية الجاذبية الاقتصادية للطاقة الشمسية إلى أجل غير مسمىً. وعلاوة على ذلك، يمكنها تمكين الطاقة الشمسية من تلبية الحاجات خارج نطاق ما تلبيه الكهرباء تقليديًّا، وهي خطوة أساسية نحو تسخير الشمس لتلبية معظم حاجات البشرية من الطاقة في وقت ما من هذا القرن.

جدول (3.1): مقدّمة للابتكار

وفقًا للاقتصادي النمساوي جوزيف تشومبيتر (Josef Schumpeter,1883-1950)، فإن

الابتكار هو منتج أو عملية تقنية تمّ تسويقها أو طرحها في السوق لأول مرة(أ). لقد فرّق تشومبيتر الابتكار innovation عن الاختراع invention، وهو أول تطوّر للتقنية؛ لذلك فحتى إذا لم تخترع الشركة تقنية ما، فبإمكانها أن تبتكر من خلال إدخال هذه التقنية إلى السوق بنجاح. (بالإضافة إلى الإشارة إلى التقنية التي تمّ تسويقها، يمكن أن يشير مصطلح الابتكار إلى فعل الابتكار.)

قد يُطلق على تعريف تشومبيتر للابتكار اليوم اسم الابتكار التقني، وقد قدّم العلماء في الآونة الأخيرة أنواعًا أخرى من الابتكار. وتحتفظ هذه الاستخدامات بالتعريف الأساسي الذي يعني أنّ الابتكار هو طرح شيء ما يجري اعتماده في سياق العالم الحقيقي لأول مرة، وتشمل الأمثلة:

- الابتكار المالي: إشهار الأدوات المالية أو المؤسّسات أو الأسواق الجديدة في قطاع معين(ب.)

- ابتكار نموذج الأعمال: تقديم عروض منتجات أو نماذج إيرادات أو ممارسات تشغيلية جديدة في قطاع معين(ج.)

- الابتكار النظامي: تطبيق مناهج جديدة لتصميم نظام معين. تشمل البنية التحتية المادّية لأي نظام الطاقة (مثل شبكة الكهرباء) والأسواق الاقتصادية (مثل أسواق الطاقة بالجملة)، والسياسات العامة (مثل اللوائح التي تحكم مرافق الطاقة)(د.)

المراجع:

a. Adam B. Jaffe, Richard G. Newell, and Robert N. Stavins, “Technological Change and the Environment,” in K-G Maler and J. R. Vincent (eds.), Handbook of Environmental Economics, Volume 1 (Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V., 2003): 461–516.

b. This is based on the Financial Times Lexicon definition of financial innovation, http://lexicon.ft.c om/Term?term=financial-innovation.

c. See Karan Girotra and Serguei Netessine, “Four Paths to Business Model Innovation,” Harvard Business Review (July/August 2014): https://hbr.org/2014/07/four-paths-to-business-model-innovati on.

d. See Theocharis D. Tsoutsos and Yeoryios A. Stamboulis, “The Sustainable Diffusion of Renewable Energy Technologies as an Example of an Innovation-Focused Policy,” Technovation 25 (2005): doi:10.1016/j.technovation.2003.12.003.

ما مقدار الطاقة الشمسية التي يحتاجها العالم حقًّا؟

قال مؤسس شركة تيسلا ومديرها التنفيذي إيلون ماسك Elon Musk ساخرًا في عام 2015م: "لدينا هذا المفاعل الاندماجي المتاح في السماء يسمّى الشمس. ليس عليك فعل أيّ شيء، إنه يعمل فعلاً. يظهر كلّ يوم، وينتج كمّيّات هائلة من الطاقة"[9].

أجل، إن الشمس البعيدة هي مصدر الطاقة الأكثر فاعلية والمتاح للاستخدام البشري، وسيحتاج العالم إلى تسخيرها أكثر مما عليه الوضع حاليًّا للانتقال بعيدًا عن الوقود الأحفوري. تنتج الشمس ملياري ضعف الطاقة التي تنتجها شظية الضوء التي تصل في النهاية إلى الأرض، ومع ذلك، فإنّ تلك الشظية توفر أكثر من 10000 ضعف الطاقة التي يحتاجها العالم. وهذا يعني بالنسبة إلى الولايات المتحدة، أنّه من الناحية النظرية فإنّ الألواح الشمسية التي تغطي 1٪ فقط من مساحة الأرض في ولاية تكساس يمكن أن توفر كلّ الطلب المحلي على الطاقة. ومع ذلك شكلت الطاقة الشمسية قرابة 1٪ من إجمالي توليد الكهرباء في الولايات المتحدة في عام 2016م[10]. أما على الصعيد العالمي، فقد شكلت الطاقة الشمسية قرابة 1.5 بالمئة فقط من إجمالي الكهرباء في عام 2016م. ومن الواضح أنّ طاقة الشمس الوفيرة غير مستغلة إلى حدّ كبير.

إنّ مجمل مصادر الطاقة الموجود في العالم لا يتجاهل الشمس بطبيعة الحال، بل على العكس تمامًا؛ فالوقود الأحفوري مثل النفط والغاز والفحم -التي تزوّد أكثر من 80 بالمئة من الطاقة الأولية في العالم- هي مخازن قديمة للطاقة الشمسية؛ فهي بقايا كائنات مثل العوالق التي تستخدم التمثيل الضوئي لتخزين الطاقة الشمسية كروابط كيميائية. وقد حوّلت عصور من التكسير والتسخين تحت طبقات الصخور هذه البقايا إلى وقود الغني بالطاقة الذي نستخدمه اليوم.

وتأتي 10٪ أخرى من طاقة العالم من حرق الكتل الأحيائية، مثل الخشب أو السماد الموجود بفضل ضوء الشمس، والتركيب الضوئي، والسلسلة الغذائية. والشمس مسؤولة أيضًا عن طاقة الرياح، وتسخين الغلاف الجوي للأرض وتسبّب التيارات الهوائية، التي يمكن لتوربينات الرياح تحويلها إلى طاقة. وتحرك الشمس دورة الماء، فتبخر الماء الذي يتساقط في صورة مطر في الأنهار والبحيرات وهذه بدورها تستطيع أن تدير التوربينات الكهرو- مائية لإنتاج الكهرباء. أضف إلى ذلك أنّ ثلاثة مصادر طاقة أخرى موجودة لا تأتي من الشمس. ومن هذه المصادر مصدران يصعب تسخيرهما (طاقة المدّ والجزر الناتجة عن جاذبية القمر، والطاقة الحرارية من نواة الأرض الساخنة والمشعّة والصفائح التكتونية المنزلقة)، وقد تمّ تجاهلهما إلى حدّ كبير. أما المصدر المتبقي (الطاقة النووية في ذرّات اليورانيوم الناتجة عن انفجارات النجوم البعيدة) فيُمثّل نسبة قليلة من الطلب العالمي على الطاقة الأولية. لذا فإنّ الطاقة كلّها تقريبًا التي يستخدمها العالم اليوم تأتي من الشمس بشكل أو بآخر.

ولكي نتمكن من الانتقال من الوقود الأحفوري، يجب علينا زيادة الاستخدام المباشر للطاقة الشمسية بشكل سريع. والأولوية الأولى لتحقيق ذلك هي زيادة كمّيّة الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية. وهذه الزيادة مطلوبة لأنّ العلماء الذين يدرسون المسارات المحتملة للحدّ من تغيّر المناخ يتفقون بشدّة على أنّ انبعاثات الكربون من قطاع الطاقة الكهربائية يجب أن تنخفض بنسبة تتراوح ما بين 80 و100٪ بحلول منتصف هذا القرن. ويُعرف هذا الهدف باسم "الإزالة العميقة للكربون deep decarbonization" من قطاع الطاقة.1 لذلك، فإن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المتجدّدة تعدّان أكثر الخيارات الواعدة لإزالة معظم هذا الحمل الثقيل، مع مراعاة الاعتبارات الاقتصادية والسياسية.

توجد أسباب أخرى تجعل من إزالة الكربون من قطاع الكهرباء أولًا أمرًا منطقيًّا؛ ومنها أن هناك مصادر اقتصادية للكهرباء النظيفة موجودة فعلاً، في حين أنه من الصعب للغاية استبدال الوقود الأحفوري الذي يشغّل قطاعات أخرى. مثلًا، تُعدّ الخيارات معقولة التكلفة في القطاع الصناعي محدودة للغاية إذا ما أردنا استبدال الفحم والغاز الطبيعي اللذين يتم حرقهما لتزويد المصانع والمصافي بالحرارة اللازمة. أما في قطاع النقل فلا يزال النفط مهيمنًا؛ حيث يمثّل أكثر من 90٪ من الطاقة التي تستخدمها السيارات والشاحنات والطائرات والسفن، إذ يوجد، في الوقت الراهن، القليل من أنواع الوقود البديلة لهذه الاستخدامات والمجدية تجاريًّا.

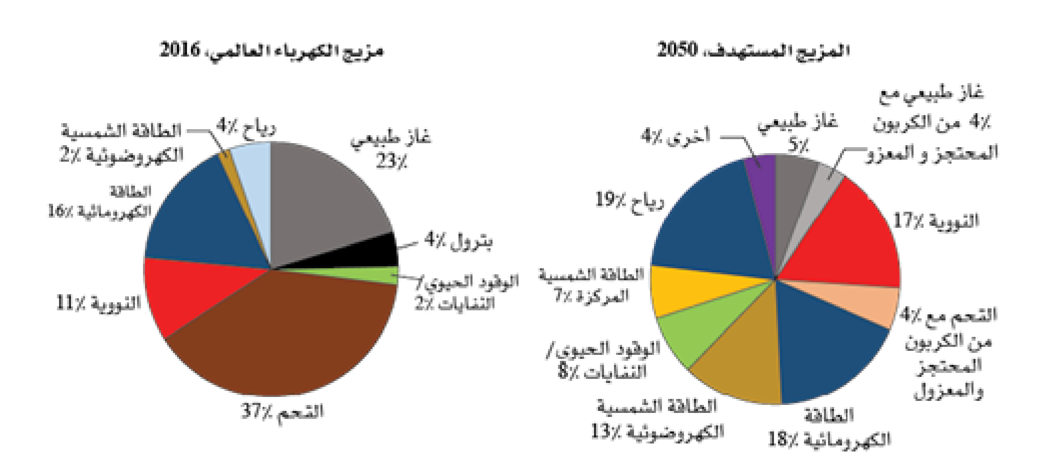
يشير أسطول المركبات الكهربائية الصغير والمتزايد إلى أنّ الكهرباء قد تكون وقودًا بديلًا قابلًا للتطبيق في قطاع النقل؛ ولذلك فإنّ إزالة الكربون من الكهرباء ليس فقطالطريقة الأسهل للبدء بخفض الانبعاثات العالمية من الطاقة فحسب، بل قد يكون أيضًا وسيلة لتقليل الانبعاثات من القطاعات الأخرى التي لم يُعرف عنها استخدام الكهرباء.

وهناك سبب آخر يبرر التحول إلى الطاقة النظيفة وهو أن من المتوقع أن يتزايد الطلب عليها؛ حيث بدأت اقتصاديات العالم تتجه نحو استخدام الكهرباء في الأنشطة التي اعتمدت تاريخيًّا على ناقلات الطاقة الأخرى (على سبيل المثال، تحلّ المحرّكات الكهربائية محلّ الوقود البترولي في تشغيل المركبات؛ وتحلّ مضخّات الحرارة الكهربائية محلّ الغاز الطبيعي في تدفئة المنازل والشركات؛ وأفران القوس الكهربائي تحلّ محلّ الفحم في إنتاج الحديد والصلب). يضاف إلى ذلك أنّ النمو السكاني والتحضّر سيزيد من عدد الأفراد الذين يطالبون بالحصول على الطاقة الحديثة، وتتوقّع الوكالة الدولية للطاقة (IEA -International Energy Agency) أن يتضاعف الطلب على الكهرباء بحلول منتصف القرن. وحتى في أفضل السيناريوهات، التي سيزيد فيها العالم إجراءات كفاءة الطاقة بشكل كبير، فإنّ من المتوقع أن يرتفع الطلب على الكهرباء بنسبة 80٪ 12.

بحلول عام 2050م، ستكون هناك حاجة إلى مصادر صفرية الكربون لتوفير معظم الطلب المتزايد على الطاقة أو كلّه في العالم. ولكن السؤال هو: ما المقدار الذي يمكن أن توفّره الطاقة الشمسية؟

بعض التقديرات في الأدبيات الأكاديمية متفائلة للغاية؛ حيث تشير إلى أنّ ما يقرب من 100 من الكهرباء العالمية يمكن أن تأتي بشكل عملي وفعّال من حيث التكلفة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بحلول منتصف القرن13. لكن، ربما تكون هذه النسبة التقديرية خيالية، حيث تجادل دراسات أخرى بقوّة أنّ تكاليف الاعتماد كليًّا على الطاقة المتجدّدة المتقطعة ستكون فلكية للغاية 14، 15.

على الجانب الآخر، تبدو الوكالة الدولية للطاقة أكثر تحفظًا بشأن آفاق الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، فقد قالت الوكالة في رؤيتها لما يجب أن يبدو عليه مزيج الطاقة الكهربائية العالمية في عام 2050، من أجل منح العالم فرصة للحدّ من الاحتباس الحراري إلى درجتين مئويتين، إنّ الطاقة الشمسية (شاملة مزيجًا من محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركّزة) ستوفّر 20٪ فقط من كهرباء العالم. وإذا ما أضفنا مساهمة الطاقة الناتجة من الرياح، فإن حتى هذا أيضًا لن يرفع الحصّة الإجمالية للطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى أكثر من ثلث مزيج الكهرباء العالمي بحلول منتصف القرن. وعلى الرغم من أنّ هذا التوقّع أكثر تحفظًا من غيره في الأدبيات الأكاديمية، إلا أنه سيزيد من حصّة مساهمة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في عام 2016م بأكثر من 6٪. (الشكل3.1)16.



الشكل (3.1): وضع المزيج الحالي للكهرباء في العالم واقتراح واحد لإزالة الكربون منه. يعرض الرسم البياني الدائري مزيج الطاقة العالمي في عام 2016م، بينما يعرض الرسم البياني الأيمن توقّعات الوكالة الدولية للطاقة لهذا المزيج في عام 2050م، في حال استطاع العالم البقاء في المسار الصحيح للحدّ من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 2 درجة مئوية. ويمثل مجموع الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركّزة concentrated solar power- CSP حصّة الكهرباء العالمية التي يُتوقّع أن تسهم بها الطاقة الشمسية. يشير مصطلح "احتجاز ثاني أوكسيد الكربون وتخزينه" - carbon capture and storage CCS إلى احتجاز الكربون وعزله من محطات توليد الطاقة بالوقود الأحفوري.

المصدر: International Energy Agency (IEA), U.S. Energy Information Administration, World Energy Council.

وستكون العديد من مصادر الطاقة الأخرى أيضًا في المزيج الذي توصي به وكالة الطاقة الدولية. ويبرز هنا افتراضان: الأول، أنّ العالم سيكون قادرًا على بناء أكثر من ثلاثة أضعاف القدرة النووية الموجودة حاليًّا. والثاني، سيُعاد تجهيز كلّ محطة طاقة تعمل بالفحم بمعدّات لالتقاط انبعاثات الكربون وتخزينها بدلًا من إغلاقها. تبدو هذه الخطة صحيحة، ظاهريًا، من حيث إنّها تستند إلى محفظة متنوّعة من الموارد صفرية الكربون. يُضاف إلى ذلك أنّه نظرًا إلى استخدام كلّ من المحطات النووية والأحفورية على نطاق واسع في قطاع الطاقة اليوم، فإن دمجها في مزيج الكهرباء المستقبلي سيكون أقلّ إزعاجًا للوضع الراهن.

لكن سيكون من الخطورة بمكان المراهنة على هذا الطريق لإزالة الكربون من قطاع الطاقة، وقد تكون زيادة القدرة النووية إلى ثلاثة أضعاف أمرًا صعبًا، نظرًا إلى أنّ حصّة الطاقة النووية من إمدادات الكهرباء العالمية قد انخفضت فعليًّا خلال العقد الماضي نتيجة لارتفاع التكاليف والمعارضة السياسية17. ولا يتوقف الأمر عند هذا الحد، بل إنّ المراهنة على نجاح عملية احتجاز الكربون وتخزينه من المحطات الأحفورية يمكن أن يتكون أكثر خطورة؛ إذ لا يوجد سوى عدد قليل من التطبيقات على أرض الواقع حول العالم ومعظمها باهظ الثمن. ومع ذلك، فإنّ المخاطر لا تجعل التخلي عن هذه المصادر أمرًا مقبولًا؛ إذ يمكن أن توفّر كلّ من المحطات النووية والأحفورية، التي تعمل على احتجاز الكربون وتخزينه، طاقة موثوقة سهلة ورخيصة؛ لتساند الإنتاج المتقطع من طاقة الرياح والطاقة الشمسية.

قد يكون النهج الحكيم هو الاستعداد للوضع الأسوأ إذا لم يتمّ توسيع هذين المصدرين بشكل سريع. وتتمثّل إحدى طرق القيام بذلك في التخطيط للطاقة الشمسية وطاقة الرياح للإسهام مجتمعة في معظم إمدادات الكهرباء في العالم بحلول منتصف القرن. ومن بين مجموعة من الافتراضات المختلفة حول كيفية تطوّر تكاليف التقنية -وعلى افتراض أنّ توسيع منشئات الطاقة النووية واحتجاز الكربون لن يكون مجديًا إلى حد كبير-، فإنّ أكثر طريقة اقتصادية لإزالة الكربون من قطاع الطاقة هي أن تسهم الطاقة الشمسية بما لا يقل عن ثلث (ووفقًا لبعض الافتراضات، أكثر من نصف) الكهرباء العالمية بحلول عام 2050م18.

إنّ الهدف العالمي للطاقة الشمسية لتوفير ثلث مزيج الكهرباء يعادل تقريبًا من حيث النسبة المئوية هدف ألمانيا في منتصف القرن. ومع ذلك، فإنّ تحقيق هذا الهدف على نطاق عالمي سيكون أكثر صعوبة. وفي الوقت الذي تحتاج فيه ألمانيا إلى رفع طاقتها الشمسية أربع مرات للوصول إلى هدفها، إلا أنه سيتعيّن على بقية العالم زيادة مصادر الطاقة الشمسية من أقلّ من 2٪ في عام 2016م إلى ما يزيد على 30٪ بحلول عام 2050م. وسيتعيّن على الطاقة الشمسية أن تزيد حصّتها من الكهرباء العالمية وفي الوقت نفسه مواكبة الحركة المتنامية في هذا المجال، التي يمكن أن تتضاعف بحلول منتصف القرن. وأخيرًا، من أجل تحقيق انتشار الطاقة الشمسية حول العالم بمقدار الثلث على

الأقلّ، فإن بعض المناطق ستحتاج إلى تحقيق أكثر من تلك النسبة لتعويض مناطق أخرى ضعيفة الأداء.

وإذا ما أدركنا حجم التحدّي الذي نواجهه، فقد يتساءل أحدنا لماذا من الحكمة أن نخطط لمستقبل قد يتطلّب مضاعفة السعة الشمسية العالمية ثلاثين ضعفًا أو أكثر؟ ألن تكون مضاعفة القدرة النووية ثلاث مرات مسارًا أسهل لإزالة الكربون؟ إن هذا ممكن جدًّا من منظور تقني، لكنّ الطاقة الشمسية لها ميزتان تشفعان لها بكلّ قوة. أولًا: استمرارية الانخفاض الكبير في التكاليف الإنتاجية- على النقيض من ذلك بالكاد انخفضت تكلفة المفاعلات النووية في العقود الأخيرة، بل صارت أكثر تكلفة في بعض الأماكن19. ثانيًا، لا تواجه الطاقة الشمسية العقبات السياسية الشديدة التي تُعيق الطاقة النووية. وفي الواقع، فإنّ جمهورًا سياسيًّا متزايدًا يدعم بحماس نشر المزيد من الطاقة الشمسية.

وعلى الرغم من أنّ هدف منتصف القرن لتوفير ثلث كهرباء العالم من الطاقة الشمسية يُعدّ طموحًا كبيرًا، إلا أن الإمكانات اللامتناهية للطاقة الشمسية لتلبية احتياجات البشرية من الطاقة أكبر من ذلك بكثير؛ كونها مصدر الطاقة الأكثر وفرة على الأرض. يمكن لتقديرات الإمكانات التقنية للطاقة الشمسية، أو مقدار ضوء الشمس الذي يمكن تحويله عمليًّا إلى طاقة، أن تتباين وفقًا للقيود البيئية والجغرافية والتقنية، بعامل يزيد على 10020. ولكن الطاقة الشمسية، مع ذلك، تتفوق على غيرها من مصادر الطاقة بقدرتها التقنية على توفير حاجات الطاقة في العالم مرات عدة21.

لذلك، فإن الهدف الأكثر منطقية، في مرحلة ما في النصف الثاني من القرن الحادي والعشرين، هو أن تصبح الطاقة الشمسية المصدر الأساسي للطاقة في العالم؛ لأنّها تمثّل معظم الطلب على الطاقة 22. وسيتطلب تحقيق هذا الهدف أكثر بكثير من مجرّد تحويل الألواح الشمسية الكهروضوئية ضوء الشمس إلى طاقة، بل سيتطلّب طرقًا لتحويل ضوء الشمس إلى وقود محمول وإلى طاقة حرارية. وسيتطلّب أيضًا أنظمة طاقة ذات تصوّر مختلف عما هي عليه الآن، لتكون مهيأة لربط طاقة الشمس بحاجات الطاقة في العالم.

قد يبدو تحقيق هذه الرؤية صعبًا، لكن رئيس شركة تيسلا إيلون ماسك واثق من أنّ العالم سيحقق هذا الهدف؛ فقد تنبّأ بأنّ: "الطاقة الشمسية ستكون هي الوسيلة الأساسية لتوليد الطاقة. ستكون أقلية على الأقلّ في البداية، ولكنها ربما تكون أغلبية بعض الشيء على المدى الطويل".

أزمة رأس المال

تتمثّل العقبة الأكثر إلحاحًا أمام استمرار صعود الطاقة الشمسية في أنّ أكبر المستثمرين في العالم قد لا يعدّونها فرصة استثمارية كبيرة حتى الآن. وهذا الاعتقاد مثير للقلق؛ لأنّ معظم التكاليف المالية لمشروع الطاقة الشمسية يستلزم إنفاقها في البداية، في حين أنّ الإيرادات تتدفّق من خلال مبيعات

الطاقة. لا يمكن أن تصبح الطاقة الشمسية مصدرًا رئيسًا للطاقة، وترتفع من مستوى 2٪ من كهرباء العالم، وهو الوضع الحالي، من دون حشد رأس مال ضخم من أجل تمويل تكاليفها الإنشائية الأولية.

يُعدُّ الاستثمار الخاص في العالم المتقدّم أمرًا مهمًّا؛ لأنه على الرغم من أنّ دافعي الضرائب ربما وافقوا على (إلا إن لم يلاحظوا ذلك) الدعم السخي للطاقة الشمسية عندما كانت الطاقة الشمسية مصدرًا مناسبًا للطاقة، ولكنّهم لن يكونوا مستعدين لدعم رسملة الطاقة الشمسية على نطاق أوسع من ذلك بكثير. على سبيل المثال، احتضن نموذج شركة إنيرجيفيند الألمانية المدفوع بالدعم الحكومي صناعة الطاقة الشمسية الناشئة بنجاح، ولكن أكثر من ربع متوسّط فاتورة الكهرباء المنزلية الألمانية اليوم هو تكلفة إضافية لدعم الطاقة المتجدّدة؛ بعدما كانت 5٪ فقط قبل عقد من الزمن23 . وبعد أن خفضت الحكومة بالفعل الدعم لمشاريع الطاقة الشمسية الجديدة، فمن غير المرجح أن يتحمّل المستهلكون دفع أكثر مما يدفعونه الآن. أما في العالم النامي، حيث تندر المساعدة الحكومية في البداية، فيعدّ الاستثمار الخاص غير المدعوم أمرًا بالغ الأهمّية لكي تنطلق الطاقة الشمسية في تلك الأسواق من البداية.

لا تبدو فجوة رأس المال هذه واضحة من إحصائيَّات زيادة تمويل الطاقة الشمسية؛ ففي عام 2016م حُوِّل معظم التمويل لأيّ تقنية لتوليد الطاقة، سواء أكانت نظيفة أم غير ذلك؛ من أجل استثمارها في الطاقة الشمسية، لتصل قيمتها إلى 116 مليار دولار24 25. وأدّى الاستثمار إلى تركيب أكثر من 70 جيجاواط من الطاقة الشمسية على مستوى العالم في ذلك العام (بزيادة 20٪ عن عام 2015م)، حيث استمرت الطاقة الشمسية في الانخفاض، وصارت أرخص مصدر لتوليد الطاقة -أرخص من الرياح والفحم والغاز- في الاقتصادات الناشئة، بما في ذلك الصين والهند والبرازيل26 . ويبدو من الأرقام إلى حد ما أنّ الاستثمار في الطاقة الشمسية آخذ في الازدهار.

لكن الواقع يشير إلى أن حجم التمويل المتاح من المصادر التي أوصلت الطاقة الشمسية إلى ما هي عليه اليوم يتضاءل مقارنة بما ستحتاجه الطاقة الشمسية في العقود القادمة؛ فإذا كان العالم يسعى للحدّ من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى درجتين مئويتين (كما ترى شركة بلومبيرغ لتمويل الطاقة الجديدة Bloomberg New Energy Finance)، فيجب أن يكون الاستثمار ضعف ما هو عليه حاليًّا لتحقيق ذلك بحلول عام 2040. وبعبارة أخرى، ستكون هناك حاجة إلى أكثر من 2.5 تريليون دولار من الاستثمارات الإضافية للطاقة الشمسية، وهذا يزيد فيما يبدو عمّا يرغب به المستثمرون للدخول في هذا القطاع. أما ما يضاعف هذا التحدّي فهو أنّ التسهيلات المالية يمكن أن تكون أقلّ وفرة مع ارتفاع أسعار الفائدة في الولايات المتحدة وأماكن أخرى27.

قد توفّر مصادر رأس المال الحالية ما يصل إلى ثلث الأموال التي ستحتاجها الطاقة الشمسية بحلول عام 2040م؛28 ففي الولايات المتحدة تُموَّل معظم مشاريع الطاقة الشمسية بطريقة غامضة تُعرف باسم تمويل الأسهم الضريبية tax equity finance، ونظرًا إلى أنّ الحكومة الفيدرالية تقدّم -في

الأساس- خصمًا ضريبيًّا بنسبة 30٪ لمنشآت الطاقة الشمسية، فإنّ البنوك الكبرى والشركات الأخرى التي تدفع ضرائب بمليارات الدولارات توافق على الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية، والاستفادة من الحوافز الحكومية لخفض فاتورتها الضريبية. وكان من المقرّر أن ينخفض الائتمان الضريبي ابتداءً من عام 2020م. وقد تقلل إمكانية إصلاح نظام ضرائب الشركات من شهية المستثمرين للاعتمادات الضريبية. وعليه، من المحتمل أن يكون مستثمرو الأسهم الضريبية، الذين موّلوا الجزء الأكبر من مشروع 25 جيجاواط للطاقة الشمسية في الولايات المتحدة، غير راغبين في تمويل المئات التالية من الجيجاواط.

كما دعمت الحوافز العامة في أوروبا تمويل الطاقة الشمسية، وشجّعت محطات الكهرباء ومستثمري الأسهم الخاصّة وصناديق البنية التحتية على ضخّ رأس المال في مشاريع الطاقة الشمسية29، لكنّ مثل هذه الحوافز العامة بدأت تجفّ في أوروبا، حتى في الوقت الذي تسعى فيه الدول لتحقيق مضاعفة في إنتاج الطاقة الشمسية.

ولعبت بنوك التنمية الوطنية والدولية على حدّ سواء دورًا حاسمًا في جميع أنحاء العالم النامي من خلال ضخّ رأس المال لتحفيز الاستثمار في الطاقة الشمسية30. ومع ذلك، فإنّ موارد بنوك التنمية غير كافية لدعم المرحلة القادمة من نمو الطاقة الشمسية، الأمر الذي سيتطلب تدفّق رأس المال إلى العالم النامي. مثلًا، في عام 2016، وافق بنك التنمية الآسيوي The Asian Development Bank، الذي يتخذ من مانيلا مقرًا له، على إنفاق نصف مليار دولار لمساعدة الهند في تمويل الطاقة الشمسية على الأسطح، وهي صفقة كبيرة لسنوات عدّة31 . وستحتاج الهند مع ذلك إلى ما يقرب من 200 ضعف هذا المبلغ من المال؛ أي نحو 100 مليار دولار، لتحقيق هدفها المتمثل في 100 جيجاوات من الطاقة الشمسية بحلول عام 2022م. ولن ينتهي تعطّشها للحصول على رأس المال عند هذا الحدّ؛ نظرًا إلى أنّ هدفها لعام 2030م هو 250 جيجاوات من الطاقة الشمسية المنتشرة على مستوى الدولة. ومع ذلك تتوقّع مجموعة مبادرة سياسة المناخ Climate Policy Initiative أنّ الهند ستفشل في تحقيق هدفها التمويلي لعام 2022م بنسبة 30٪ تقريبًا من دون وجود مصادر جديدة لرأس المال32 .

إما المستثمرون الوحيدون الذين لديهم القدرة على تمويل المرحلة المقبلة من نمو الطاقة الشمسية فهم المستثمرون المؤسّسيون؛ كصناديق التقاعد وصناديق التأمين وصناديق الثروة السيادية. وهذه مجتمعة تدير أكثر من 100 تريليون دولار33 ؛ حيث تُعدّ بضعة تريليونات من الدولارات اللازمة لتدخل الطاقة الشمسية إلى مشهد الطاقة العالمي بالنسبة إليهم مبلغًا بسيطًا. وتكمن المشكلة في أنّ 1٪ فقط من هذا المبلغ الضخم يُستثمر حاليًّا في البنية التحتية على مستوى العالم، وتحصل البنية التحتية منخفضة الكربون على دعم أقلّ من ذلك. وفي الواقع أنه جرى تمويل 2.5 بالمئة فقط من جميع أصول الطاقة النظيفة من قبل مؤسسات استثمارية في الفترة من 2004م إلى 2011م34 .

قد يتساءل مراقب عابر عن سبب عدم تزاحم المؤسسات الاستثمارية بالفعل على مشاريع الطاقة الشمسية. إن هؤلاء المستثمرين يتوجهون بقوة إلى الاستثمارات طويلة الأمد والموجّهة نحو العائد؛ أي استثمار أموالهم في مشاريع قليلة الخطورة لفترات طويلة من الزمن، وتلقي مدفوعات جيدة متكرّرة مقابل بذلك. ويبدو أنّ مشاريع الطاقة الشمسية تناسب هذا الملف الاستثماري؛ فلطالما كانت هذه المشاريع تاريخيًّا رهانات آمنة. ويستطيع المستثمرون توقيع عقود طويلة الأجل لبيع الكهرباء بتسعيرة ثابتة للمحطات المحلية مقابل الحصول على الأولوية في أسواق الكهرباء، وهذا بفضل السياسة العامة، المؤاتية. يضاف إلى ذلك أنه بمجرّد بناء محطة للطاقة الشمسية، فإنّها تظل موجودة في مكانها، وتستغلّ أشعّة الشمس، وتُدرّ الدخل عن طريق بيع الكهرباء، وبالكاد يوجد ما يعيق ذلك، مقارنة بمحطات الطاقة الأكثر تعقيدًا مثل المحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري أو المحطات النووية.

تكمن المشكلة في أنّ مؤسسات الاستثمار تجد صعوبة في الاستثمار مباشرة في مشاريع الطاقة الشمسية، وينتهي بها الأمر بدلًا من ذلك إلى الاستثمار من خلال وسطاء؛ مثل صناديق الأسهم الخاصّة. لكن هذه الصناديق تأسست للقيام بمراهنات أكثر خطورة، وتحقيق عوائد أعلى مما يمكن أن تحقّقه مشاريع الطاقة الشمسية التي تُعدّ قليلة المخاطر والعوائد أيضًا. وهذا القيد يحدّ من عدد مشاريع الطاقة الشمسية التي ستستثمر فيها صناديق الأسهم الخاصّة، ومن ثم يحدّ ذلك من الاستثمار الذي يمكن لشركات الاستثمار القيام به في مشاريع الطاقة الشمسية من خلال الوسطاء.

وعلى الرغم من أنّ العديد من مشاريع الطاقة الشمسية تُعدّ من الناحية النظرية فرصًا استثمارية مثالية للمستثمرين المؤسسيين، إلا أن الصعوبات العملية تمنعهم من استثمار رؤوس أموالهم في تلك المشاريع مباشرة. لدى هؤلاء المستثمرين العمالقة اشتراطان عند تجميع محافظهم المالية، وكلاهما يتعارض مع الطاقة الشمسية حاليًّا. الأول، هو السيولة؛ أي القدرة على شراء استثماراتهم وبيعها بسرعة في السوق، حيث تمكن السيولة المستثمر من الاستثمار من دون الحاجة إلى دفع مبالغ كبيرة أعلى من سعر السوق، وبيع استثمار من دون الحاجة إلى تقديم خصم كبير أقلّ من سعر السوق. أما الشرط الثاني، فهو أنّ المؤسسات الاستثمارية تريد استثمار مبالغ كبيرة من المال في وقت واحد، بدلًا من الاضطرار إلى القيام بالعديد من الاستثمارات الصغيرة، ولذلك تفضّل التركيز على عدد محدود فقط من الاستثمارات.

إن أسهل طريقة لاستيفاء الشرطين هي الاستثمار في الأوراق المالية المدرجة؛ أي الأسهم والسندات المدرجة في البورصات العامة؛ حيث توفّر هذه الطريقة السيولة النقدية لأنّه من السهل شراء الأوراق المالية أو بيعها في البورصات الكبيرة. ومن الممكن أيضًا استثمار مبالغ كبيرة في المحفظة الاستثمارية المتنوّعة. ولتجنب الاضطرار إلى القيام بعمليات الاستقصاء اللازم لكلّ سهم أو سند يُستثمَر، يستطيع المستثمرون الاستثمار في صناديق المؤشّرات التي هي نفسها أوراق مالية مدرجة

تجمع الكثير من الأسهم أو السندات الفردية. بوجه عام، تستثمر شركات الاستثمار ما بين 80-90٪ من محافظها في الأوراق المالية المدرجة في البورصة35.

تفشل مشاريع الطاقة الشمسية بالنسبة إلى الجزء الأكبر في تلبية أيّ من المعايير التي يطلبها المستثمرون المؤسسيون؛ إذ لا توجد طريق للتداول أو التصرّف ببيع أو شراء الأوراق المالية الخاصّة بمشاريع الطاقة الشمسية، على غرار الأسهم في البورصة العامة. لذلك، فإنّ الاستثمار في أحد مشاريع الطاقة الشمسية قد يؤدّي إلى تجميد السيولة النقدية لسنوات أو حتى عقود. وغالبًا ما يستخدم المستثمرون المؤسّسيون عددًا قليلًا جدًّا من الموظفين؛ لتبرير توخّي الحذر في عمليات استحواذ مكثّفة للمشروعات الفردية التي قد يتطلّب الاستثمار في كلّ منها عشرات الملايين من الدولارات فقط.

لكن هذا لا يعني أن شركات الاستثمار غير مهتمة بالاستثمار في الطاقة المتجدّدة على الرغم من التحدّيات. وفي الواقع، فإنّ بعضها يبتكر في إيجاد فرص استثمارية في هذا القطاع. على سبيل المثال، استثمر جهاز أبو ظبي للاستثمارADIA-Abu Dhabi Investment Authority مئات الملايين من الدولارات في شركة رينيو باور؛ أكبر شركة للطاقة الشمسية في الهند. وجمّع المستثمرون من هبات جامعة كاليفورنيا وصندوق التقاعد النيوزيلندي مواردهم من أجل الاستثمار في شركات الطاقة النظيفة حول العالم36 37. وعلى أيّ حال، فإنّ هذه الاستثمارات الواعدة لا تشكّل إلا قطرات في بحر؛ فهي لا تزال بعيدة عن تريليونات الدولارات اللازمة للتوسّع في مشاريع الطاقة الشمسية.

على الرغم من أن معظم احتياجات الاستثمار تتعلق بأنظمة الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة، إلا أن الحاجة ماسّة إلى رأس المال لتوسيع نطاق أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة من أجل توصيل الكهرباء إلى أكثر من مليار شخص يفتقرون إليها حول العالم. وينظر معظم المستثمرين في الوقت الراهن إلى الطاقة الشمسية خارج الشبكة التي يحتاجها سكان الريف الفقراء، على أنّها استثمار عالي المخاطر ومنخفض المكاسب. وعليه، فإنّ المشاريع القليلة التي تتلقى تمويلًا استثنائيًّا تحصل عليه بشروط غير مناسبة، مع معدلات فائدة عالية للقروض التي يجب سدادها في زمن قصير38 .

موّلت المؤسسات الدولية، مثل البنك الدولي والمؤسسات الخيرية غير الربحية، بجرأة حتى الآن مشاريع خارج الشبكة لسدّ النقص في رأس المال الخاص. ونتيجة لذلك، يتمتّع أكثر من 120 مليون شخص في جميع أنحاء العالم بنوع أو آخر من أنواع الطاقة الشمسية- لكن معظمها من الفوانيس التي تعمل بالطاقة الشمسية، إلا أنّه توجد أيضًا أنظمة الألواح الشمسية والبطاريات التي تساعد في توفير حاجات الطاقة الأساسية مثل الإضاءة وشحن الهواتف المحمولة. ومع ذلك، فمن أجل تحقيق الإمكانات الكاملة لأنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة للحدّ من نقص الطاقة، يجب أن يرتفع الاستثمارالسنوي بمعامل 250؛ من أجل أن يزيد من 200 مليون دولار في الوقت الراهن إلى أكثر

من 50 مليار دولار سنويًا39. وإذا تردّد المستثمرون المؤسسيون في دخول استثمارات مشاريع مزارع الطاقة الشمسية، فإنهم بالتأكيد لا يرغبون في الاستثمار في أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية في المناطق الريفية.

مما لا شك فيه أنّ توسيع انتشار الطاقة الشمسية في السنوات القادمة سيتطلب استثمارات ضخمة جدًّا سواء أكانت متصلة بالشبكة أم خارجها. ولن تكون الطرق التي حوّلت الطاقة الشمسية إلى سوق سنويّة بقيمة 100 مليار دولار كافية للمضي قدمًا؛ فرفع الاستثمار إلى تريليونات من الدولارات سيتطلب طرح أفكار جديدة ولاعبين جدد. ومن حسن الطالع، فإنّ التقدّم على هذه الجبهة بدأ في التسارع؛ حيث تبتكر صناعة الطاقة طرقًا جديدة لجعل استثمارات الطاقة الشمسية جاذبة وغير مؤلمة لمؤسسات الاستثمار. ويقدّم روّاد الأعمال نماذج أعمال لربط السكان الذين يحتاجون إلى الكهرباء بالمستثمرين الذين يبحثون عن عوائد مجزية. والخبر المفرح هنا، هو أنّ هذه التطوّرات يمكن أن تدفع الطاقة الشمسية للتغلّب على أزمة رأس المال الوشيكة، أما الخبر السيئ فهو أنّ هناك عقبات أكبر تقف في طريق الانتشار المستمر للطاقة الشمسية.

عقوبة النجاح

بدت تشيلي في عام 2013م وكأنها المكان المناسب للطاقة الشمسية. كان اقتصاد البلاد مزدهرًا على خلفية صناعة التعدين الآخذة في التوسع، التي أسهمت بثلث حصة النحاس في العالم. لكنّ أعمال التعدين تستهلك الكثير من الكهرباء، وليس لدى تشيلي نفط أو غاز أو فحم محلي لتوليد الطاقة. ومما زاد الأمر صعوبة، أنّ الأرجنتين المجاورة خفّضت صادرات الغاز الطبيعي إلى تشيلي بشكل دوري منذ عام 2004م، وتحوّلت المناجم إلى الطاقة الكهرومائية في غياب طاقة الوقود الأحفوري لتلبية معظم حاجاتها40 41. لكنّ الجفاف الذي حلّ بالبلاد، بدأ في تجفيف خزانات الطاقة الكهرومائية الموجودة في تشيلي، وواجهت السدود الجديدة معارضة شعبية شديدة42 43. ووسط هذه الويلات كلّها، برزت الطاقة الشمسية في صحراء أتاكاما المشمسة بوصفها مصدرًا وفيرًا للكهرباء بعد المناجم.

بدأ عرض القيمة المقترحة قويًّا للغاية، لدرجة أنّ مطوّري الطاقة الشمسية في تشيلي راهنوا بشكل جريء على تزويد الطاقة الشمسية إلى سوق الكهرباء من دون ضمان سعر طويل الأجل على الإطلاق. كانت هذه الخطوة من الممارسات المتعارف عليها في هذه الصناعة؛ فالإجراء المتبع في العالم هو أن يوقّع مطوّر الطاقة الشمسية اتفاقية شراء الطاقة مع أحد العملاء؛ مثل محطة أو مستخدم طاقة للأغراض الصناعية. ثم يوافق العميل المسمّى "مشتري المنتج offtaker"، بموجب هذه الاتفاقية على شراء الطاقة من محطة الطاقة الشمسية بسعر متفق عليه لسنوات عدّة (غالبًا خمسة عشر عامًا أو أكثر)، ويستفيد المطوّر من ضمان التدفّقات النقدية لسنوات عديدة في المستقبل.

ويسهّل الضمان أيضًا زيادة رأس المال من المقرضين والمستثمرين لدفع الفاتورة مقدّمًا. ويستفيد العميل من تسعيرة الطاقة الثابتة طويلة الأجل حتى لو ارتفعت تكلفة مصادر الكهرباء الأخرى بمرور الوقت. كان التخلي عن اتفاقية شراء الطاقة وتشغيل مزرعة شمسية بدلًا من ذلك كـ "محطة طاقة تجارية" تبيع الطاقة في الأسواق بأسعار اليوم غير الثابتة والمتقلّبة على مدار الساعة (و تعرف باسم "سوق الكهرباء بالجملة")، هرطقة شمسية.

لكنّ المطورين في تشيلي ارتأوا أنّه من المضمون بقاء الأسعار مرتفعة؛ وذلك نظرًا إلى مجموعة التحدّيات التي تواجه مصادر الطاقة الأخرى، وكانت صناعة النحاس التي تدعم الاقتصاد التشيلي بشكل أساسي تراوح مكانها. لذلك، عندما أحجم عمال المناجم عن توقيع اتفاقيات شراء الطاقة طويلة الأجل، تمكن المطوّرون من زيادة رأس المال لمشاريع الطاقة الشمسية التجارية وبيعها في أسواق الطاقة التشيلية لأنّ أسعار الكهرباء كانت مرتفعة.

لكن حدث وأن انهارت تلك الأسعار في جميع أنحاء العالم بسبب الانكماش الاقتصادي الذي أصاب السلع الأساسية، وانخفضت أسعار النحاس إلى النصف بين عامي 2013م و2016م، ما قلّل الطلب على الكهرباء44. أنقذت موجات الجفاف تشيلي خلال الفترة نفسها؛ لذلك عملت محطات الطاقة الكهرومائية بكامل طاقتها، ما أدى إلى تشبّع أسواق الكهرباء. وعلاوة على ذلك أدّى الاندفاع إلى إضافة الطاقة الشمسية، بما في ذلك أكثر من 1 جيجاواط في عام 2015م إلى زيادة المعروض للأسواق التي كانت تواجه تراجعًا في الطلب45.

ونتيجة لذلك، أعطت تشيلي الكهرباء بالمجان، حيث وصلت الأسعار إلى الصفر في فترة ما بعد الظهر (عندما كان إنتاج الطاقة الشمسية في أعلى مستوى) في معظم الأيام في عامي 2015م و2016م46، ما أدّى إلى انخفاض إيرادات محطات الطاقة الشمسية التجارية التي سارع مطوّروها للعثور على عملاء لتوقيع اتفاقيات شراء الطاقة وتوفير ضمان الدخل. ووقّع مطوّرو المشاريع الجديدة عقودًا طويلة الأجل بأيّ ثمن لتجنّب الكارثة التي حلّت بمحطات الطاقة التجارية؛ فقد وافق مطوّر إسباني في أغسطس 2016م على عقد طويل الأجل لتزويد المحطات التشيلية بالطاقة مقابل 2.9 سنت فقط لكلّ كيلوواط/ساعة، مسجّلًا رقمًا قياسيًّا عالميًّا جديدًا (على الرغم من أنّ هذا الرقم القياسي سيستمر لمدّة شهر واحد فقط قبل بدء المزاد في أبو ظبي الذي سجّل رقمًا أدنى من ذلك)47.

تفتح حالة تشيلي نافذة على المشكلات الاقتصادية التي يمكن أن تواجهها الطاقة الشمسية عندما تدخل مرحلة التشغيل. ونظرًا لأنّه لا يمكن التحكّم في الطاقة المولّده من الألواح الشمسية (في لغة نظام الطاقة، تُعرف الطاقة الشمسية بأنها مورد "غير قابل للنقل والتوزيع dispatchable-non")، فإنّ جميع الألواح الشمسية في المنطقة الجغرافية نفسها ستنتج الطاقة عندما تتعامد الشمس معها، ما يؤدّي إلى إغراق السوق. وقد أدّى الانكماش الاقتصادي في تشيلي إلى جانب تخمة المعروض من الطاقة الشمسية، إلى خفض الأسعار إلى الصفر. أما في حالات زيادة نسبة توليد الطاقة الشمسية،

فيعتقد أنّ فائض العرض وحده يعدّ سببًا كافيًا لجعل الطاقة الشمسية عديمة القيمة، حيث يمكن لمشكلة انكماش القيمة أن توقف ارتفاع الطاقة الشمسية على المدى الطويل، وهي عقوبة غير متوقّعة ستتكبّدها الصناعة لنجاحها الكبير في زيادة القدرة الكهروشمسية.

"ولكن علينا ألّا نتسرّع في الحكم"، هكذا يردّ كثير من المشكّكين في هذا التوقع؛ حيث يرون، وهم على حق، أن الاتجاه الذي اتبعته تشيلي في بيع الطاقة الشمسية بالجملة هو انحراف عالمي؛ لأنّ عقود اتفاقيات شراء الطاقة ساعدت في أماكن أخرى من العالم في حماية الطاقة الشمسية من تقلّبات أسعار الطاقة48. على سبيل المثال، أدّى ارتفاع مستويات الكهروشمسية في ألمانيا إلى إلحاق الضرر بمداخيل المفاعلات الأحفورية والنووية بدلًا من تقويض عائدات الطاقة الشمسية. وكما هي الحال في تشيلي، فقد انخفضت أسعار الطاقة بالجملة في ألمانيا بمقدار الثلثين منذ عام 2008م مع دخول المزيد من الطاقة المتجدّدة إلى السوق، فعندما يتوافر فائض في المعروض من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تصبح أسعار الطاقة في بعض الأحيان سلبية.

تبدو حجّة المشككين مقنعة ظاهريًا، ففي ألمانيا، يلحق ارتفاع الطاقة الشمسية الضرر بكلّ مولدات الطاقة الأخرى، ولكن ليس الطاقة الشمسية نفسها. وعلى الرغم من أنّ أسواق الطاقة أنظمة معقدة للغاية، إلا أن دراسة أجريت في عام 2016م خلصت بوضوح إلى أنّ الارتفاع في الطاقة المتجدّدة هو المحرّك الأكبر لانخفاض أسعار الكهرباء بالجملة49، حيث يُعدّ هذا الانخفاض كارثيًّا بالنسبة إلى محطات الطاقة الأخرى التي تعتمد على أسعار طاقة أعلى لدفع ثمن الوقود (أي محطات الفحم والغاز)، ودفع تكاليف رأس المال الهائلة (أي المحطات النووية). لكن الطاقة الشمسية تتميّز بالحماية في سوق الطاقة الألمانية من خلال الحوافز التي تعزّز الدخل من الطاقة الشمسية حتى مع انخفاض الإيرادات من أسواق الطاقة بالجملة. ونتيجة لذلك، واجهت مرافق الطاقة الألمانية التي تمتلك بصورة تقليدية محطات تعمل بالوقود الأحفوري والنووي، ضائقة مالية كبيرة، وأعلنت إحدى محطات الكهرباء الرئيسية، (إي. أون E.ON) في عام 2015م عن أكبر خسارة لها على الإطلاق (بلغت 8 مليارات دولار). وحاولت كلّ من إي. أون وشركة ألمانية كبرى أخرى (آر. دبليو. إي. RWE)، تقليص خسائرهما عن طريق فصل محطاتها العاملة بالوقود الأحفوري ومحطاتها النووية، واحتفظت بمحافظ الطاقة المتجدّدة الأكثر ربحية51. إن الدرس المستفاد من هذا، كما جادل بعضهم، هو أنه على الرغم من أنّ الطاقة الشمسية ستقلب أسواق الطاقة عندما تصبح في كلّ مكان، فإنّ ربحيّتها ستظلّ مستديمة في الوقت الذي تعاني فيه أنواع أخرى من المصادر.

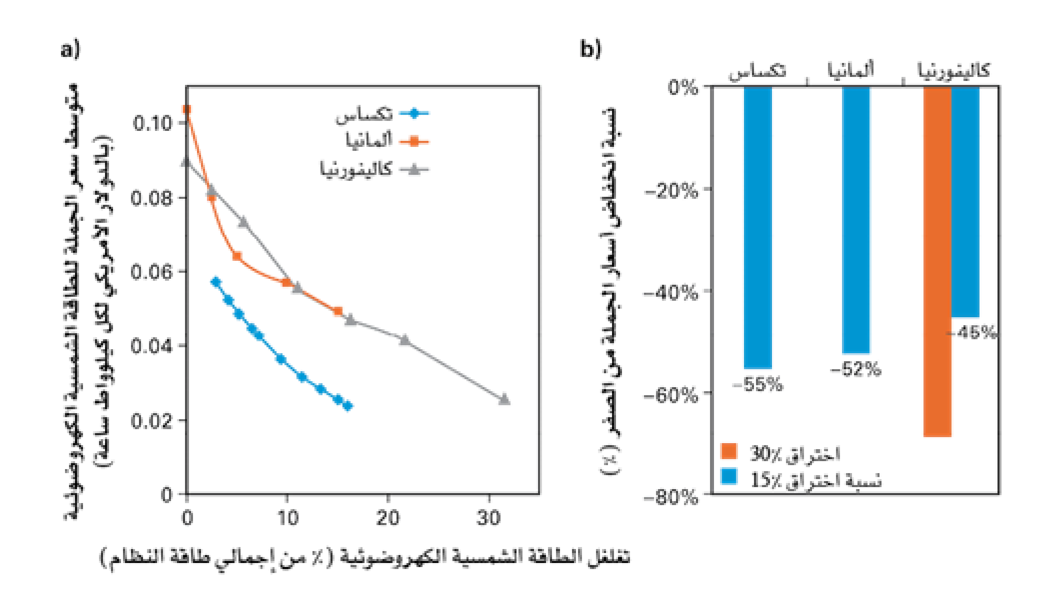
لكن هذه الحجة قصيرة النظر؛ فحتى إذا كانت أنظمة الدعم تحمي الطاقة الكهروشمسية اليوم، فمن غير المرجح أن تستمر؛ لأن ارتفاع انتشار الطاقة الشمسية يجعلها أكثر تكلفة. لقد طبّقت ألمانيا إصلاحات تخفض أحيانًا السعر المدفوع لمولدات الطاقة الشمسية في حال كانت أسعار بيع الجملة منخفضة52. من حيث المبدأ، تؤدّي زيادة نسبة توليد الطاقة الشمسية إلى تدهور القيمة التي تقدّمها

الطاقة الشمسية لشبكة الكهرباء، بصرف النظر عن الإيرادات التي يضمنها نموذج سياسة معين لأصحاب الطاقة الشمسية.

سيؤدّي انكماش القيمة هذا إلى تقليل القدرة التنافسية الاقتصادية للطاقة الشمسية على المدى الطويل، وإذا استمرت اتفاقيات شراء الطاقة بوصفها الطريقة المعتمدة لتمويل الطاقة الشمسية، فإنّ السعر طويل الأجل الذي ستؤمّنه مشاريع الطاقة الشمسية الجديدة من مشتري المنتج سوف تنهار. وإذا أفسحت العقود الطويلة الأجل المجال لترتيبات تجارية كما حدث في تشيلي، فقد تتبخّر أرباح الطاقة الشمسية بشكل أسرع. وتتحرّك السوق بالفعل في هذا الاتجاه؛ حيث تضغط بعض محطات الطاقة في الولايات المتحدة لتقليل مدّة اتفاقيات شراء الطاقة التي يتمّ التوقيع عليها.

بصرف النظر عن الآثار قريبة المدى المتعلقة بترتيبات التعاقد، فإنّ ربحية الطاقة الشمسية على المدى الطويل سوف تمليها قيمتها الاقتصادية الأساسية في الأسواق العالمية، وستنخفض هذه القيمة مع ربط المزيد من الطاقة الشمسية بالشبكة، وفقًا لمبادئ العرض والطلب البسيطة.

لقد قمت أنا وشايل خان Shayle Kann من مركز إعلام التقنية الخضراء للأبحاث GTM Research، ذراع شركة Greentech Media، بمسح الأدلة الأولية لانكماش القيمة في جميع أنحاء العالم، بالإضافة إلى نماذج اقتصادية مختلفة لمدى السوء الذي يمكن أن تحصل عليه مع زيادة انتشار الطاقة الشمسية نحو الهدف المتمثّل في توفير ثلث الطلب العالمي على الطاقة.53 لقد رسمنا في الشكل (3.2) أسعار سوق الطاقة التي ستتلقاها المولّدات الشمسية في ولايتي كاليفورنيا وتكساس وألمانيا إذا لم تكن محمية بموجب عقود طويلة الأجل أو إعانات؛ حيث يقيس هذا النهج القيمة الاقتصادية الانكماشية التي توفّرها الطاقة الشمسية للشبكة مع ارتفاع انتشارها. وتبدو النتائج صارخة؛ فعندما تعتمد الشبكة على الطاقة الشمسية بنسبة 15٪ من إجمالي حاجاتها من الطاقة، فستنخفض قيمة الطاقة الشمسية إلى أكثر من النصف، أما عند استخدام الطاقة الشمسية بنسبة 30٪، فستنخفض قيمة الطاقة الشمسية إلى أكثر من الثلثين في محاكاة لسوق الطاقة في ولاية كاليفورنيا.



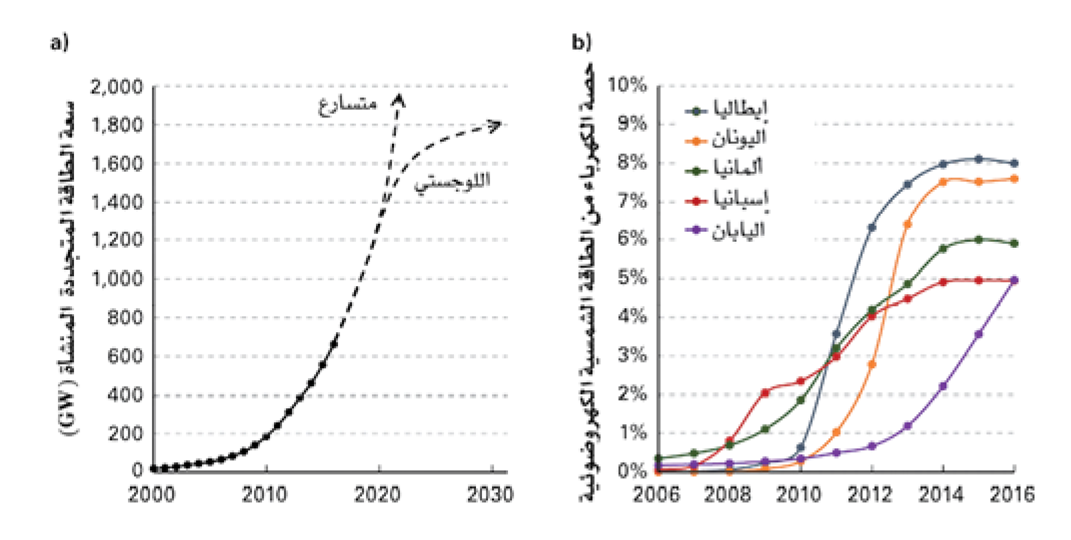
الشكل (3.2): انكماش قيمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. تعرض اللوحة (أ) نتائج ثلاث عمليات محاكاة مختلفة لشبكات الطاقة في أجزاء مختلفة من العالم، التي تتنبّأ بانخفاض قيمة الكهرباء التي تنتجها مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع زيادة انتشار الطاقة الشمسية الكهروضوئية. (يُقاس الانتشار بوصفه نسبة مئوية من الطلب السنوي على الطاقة الكهربائية، مقيسة بالكيلوواط/ساعة، التي يتم توفيرها بوساطة الطاقة الشمسية الكهروضوئية.) اللوحة (ب) تبيّن انكماش قيمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية بنسبة 15% 30% من انتشار الطاقة الشمسية الكهروضوئية، مقارنة بعدم الانتشار.
المصدر: أعيد طبع الشكل بإذن من Kann&Sivaram (2016).

ولأن الطاقة الشمسية تولد معظم طاقتها خلال ساعات قليلة من النهار، وحتى لو كانت تمثّل حصّة متواضعة من الطاقة السنوية لشبكة الطاقة، ولنقل 20٪، فإنّها تمثّل حصّة هائلة من الطاقة الفورية التي يمكن توليدها في منتصف النهار (وفي بعض الحالات، تصل إلى 100٪). وهذه الحصة المرتفعة تضاعف أثر انكماش القيمة خلال تلك الساعات.

لا تقتصر هذه الظاهرة على الأسواق الثلاثة الموضّحة في الشكل (3.2)؛ فعلى سبيل المثال، في إيطاليا، حيث اقترب انتشار الطاقة الشمسية من 10٪ في عام 2016م، تحوّل ارتفاع أسعار الطاقة من النهار إلى الليل؛ إذ يمكن لمولدات الغاز القابلة للتحكم في النقل والتوزيع بناءً على أعلى طلب، الاستفادة من الأسعار المرتفعة وزيادة قيمتها في الشبكة. لكن الطاقة الشمسية غير القابلة للنقل والتوزيع صارت أقلّ قيمة.54 تُعدّ هذه الطاقة الشمسية أكثر عرضة لانكماش القيمة من المولدات القابلة للتحكم في التوزيع، وهي فكرة مهمّة. وسوف تتضرّر مولدات الطاقة جميعها من انخفاض الأرباح إذا أُضيف الكثير منها، أو بقي فائض الكهرباء عبر الشبكة في الأوقات جميعها. وحتى المولّدات التي تعمل بالوقود الأحفوري ستكون من ضمن المتضررين أيضًا، لكنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية ستشهد انكماشًا شديدًا في القيمة مع كلّ زيادة إضافية في الكهرباء يمكن أن تولدها؛

لأنّ إنتاجها من الطاقة لا يمكن تحويله إلى وقت آخر من اليوم؛ ولذلك يمكن أن تتراكم وفرة إمدادات الطاقة الشمسية بسرعة في منتصف النهار.

ومع ذلك، قد لا تتأثر معظم أجزاء العالم من انكماش قيمة الطاقة الشمسية لسنوات عدة؛ فهذا التأخير يجعل منه أمرًا خطيرًا تحديدًا؛ لأن بذور انكماش القيمة تُزرع اليوم عن غير قصد، في حين أنّ آثاره ستصبح صارخة في المستقبل. ولذلك، حتى في الوقت الذي تشير فيه نسبة الزيادة السريعة للطاقة الشمسية اليوم إلى توقعات نمو غير مسبوقة، إلا أنّ مسار الطاقة الشمسية يتوافق أيضًا مع النمو اللوجستي (المعروف باسم "منحنى S- curve-S ")(***)، حيث سيتلاشى ارتفاع الطاقة الشمسية في هذا النوع من المسار في غضون عقدين من الزمن، عندما تصل إلى ذروة الانتشار ولكن من دون أن تحقّق هدف تلبية ثلث الحاجة العالمية للكهرباء بحلول منتصف القرن الحالي. توّضح اللوحة (أ) في الشكل (3.3) سيناريو إحدى الدراسات غير المتفائلة بالنمو اللوجستي؛ حيث يتوقّف مستوى النمو للطاقة الشمسية وطاقة الرياح معًا بعد عام 2030م، لتسهم بنحو 10٪ فقط من حاجات الكهرباء في العالم.



الشكل (3.3): تسارع النمو الأُسّي واللوجستي للطاقة المتجدّدة. في اللوحة (أ)، تمثّل النقاط المخططة حتى عام 2017م القدرة الفعلية المركبة، بالجيجاواط، لمنشآت طاقة الرياح والطاقة الشمسية العالمية. الخطوط المتقطعة هي الاستقراء لمسار النمو الأُسّي واللوجستي وفق المعطيات المتاحة. قُيِّم الاستقراء من خلال حساب متوسّط تنبّؤ النمو الذي كان يمكن حدوثه في عام 2020م من قبل مجموعة من الخبراء. تعرض اللوحة (ب) حصّة الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية في البلدان الخمسة ذات أعلى معدّلات انتشار للطاقة الشمسية على مدار العقد من عام 2006م إلى عام 2016م.

المصدر: لوحة (أ) مقتبس من Hansen et al. (2017))؛ لوحة (ب) تم إنشاؤها من البيانات الواردة في المراجعة الإحصائية لشركة بريتيش بتروليوم 2017 BP Statistical Review وتم تجميعها بوساطة كيث بيكرينغ Keith Pickering.

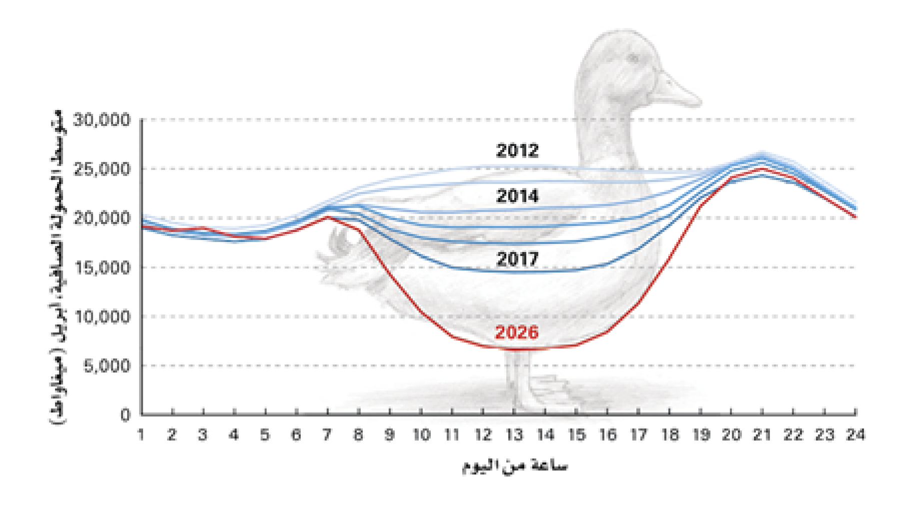
تُظهر اللوحة (ب) أنّ من بين الدول الخمس التي تمتلك أكبر حصّة من الكهرباء الناتجة من الطاقة الشمسية الكهروضوئية، شهدت أربع منها (إيطاليا واليونان وألمانيا وإسبانيا) توقّفًا عن النمو بعد أن

تراوحت بين 5-10٪. (وعلى النقيض، لم تشهد الدولة الخامسة (اليابان) تباطؤًا في نمو الطاقة الشمسية في عام 2016م، على الرغم من أن انتشار الطاقة الشمسية فيها وصل إلى 5٪ فقط. وقد حظيت ولاية كاليفورنيا (التي يُعدّ اقتصادها بحجم دولة) بنمو استثنائي في عام 2016م؛ حيث استطاعت الولاية كسر حاجز 10٪ في توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، وسدّ ما يقرب من 14٪ من حاجتها55. ومع ذلك، تظهر علامات تحذير حتى في كاليفورنيا من أنّ ارتفاع الطاقة قد لا يستمر كما يوضّحه القسم التالي)، إذا خاضت الدول، وخاصة في العالم النامي، تجربة تباطؤ نمو الطاقة الشمسية مثلما حدث في أوروبا، فإنّ نافذة العالم التي تطمح إلى أن تنزع الانبعاث الكربوني من قطاع الطاقة سوف تغلق.

منحنى البطة

سيؤدّي إغراق أسواق الكهرباء بإمدادات الطاقة الشمسية إلى انخفاض قيمتها السوقية، وقد تؤدّي إضافة المزيد من الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى الشبكة إلى إجبار المولدات الأخرى على دخول فترات من الركود في الأوقات التي تتوقّف فيها الطاقة الشمسية عن العمل. ومن الممكن أيضًا أن يؤدّي إلى زعزعة استقرار شبكة الطاقة، بالرغم من قدرتها على أن تقوم بالتصحيح الذاتي. إنّ التكاليف الخفية التي تسعى للحفاظ على موثوقية نظام الطاقة، سوف تؤثر بصورة سلبية في الجاذبية الاقتصادية للطاقة الشمسية، وقد تعلّمت ولاية كاليفورنيا ذلك الدرس بطريقة مؤلمة.

بدأت ولاية كاليفورنيا في قرع أجراس الإنذار في عام 2013م، بعد أن كانت تسعى لأن يكون لها السبق على المستوى الوطني في تركيب الطاقة الشمسية؛ حيث نشر مشغّل نظام الشبكة المستقل في كاليفورنيا (كاسيو)
(The California Independent System Operator (CAISO))، وهي مؤسسة "آيزو" غير ربحية تدير شبكة نقل كهرباء الولاية، مخططًا واقعيًا يعرض ارتفاعًا في حجم الطلب الذي ستواجهه الشبكة في المستقبل (انظر الشكل 3.4). ترسم المؤسسة منحنىً جديدًا كلّ عام بحجم الطاقة التي يُتوقع أن توفّرها الشبكة للمستهلكين في ولاية كاليفورنيا؛ وذلك بعد أن يكونوا قد استهلكوا كامل الطاقة الشمسية المولدة في منتصف النهار. ومن خلال رسم المنحنيات المختلفة معًا- اتخذت المنحنيات شكل البطة. وفي ذروة حماسها لتحويل مفهوم معقّد إلى لعبة بطة مطاطية، تبنّت مؤسسة كاسيو "منحنى البطة duck curve" كتميمة حظ لحملتها لتثقيف الجمهور حول صعوبات التحوّل إلى الطاقة المتجدّدة.



الشكل (3.4): منحنى البطة لولاية كاليفورنيا. هذه نسخة محدّثة من الشكل الأصلي الذي رسمته مؤسسة كاسيو للتنبّؤ بالضغط المتزايد على شبكة كاليفورنيا مع زيادة انتشار الطاقة الشمسية. وصلت توقعات كاسيو الأصلية لمتطلب منحدر يزيد على 1000 ميجاوات/ساعة في عام 2020م قبل ثلاث سنوات من الموعد المحدّد. بحلول عام 2026م، يمكن أن تكون المتطلبات أكثر من 4000 ميجاوات/ساعة.
المصدر: GTM Research, CAISO, and Wood Mackenzie.

عندما كانت الطاقة الشمسية في كاليفورنيا أقلّ من 3000 ميغاواط في عام 2012م، كان لهذا المنحنى بعض الانحرافات البسيطة، ما يعكس التباين في حجم استهلاك الطاقة في اليوم. وقد ضاعفت الولاية تقريبًا قدرتها الشمسية في عام 2013م. ونظرًا إلى أنّ الطاقة الشمسية تتوافق بشكل جيد مع طلب المستهلكين على الطاقة، فقد امتُصّت الزيادة المعتادة في استهلاك الطاقة في فترة الظهر، وتُركت حصّة ثابتة للطلب خلال النهار لبقية المولّدات التي تخدم شبكة إمداد الكهرباء في الولاية56.

توقّعت كاسيو بعد ذلك أنّ زيادة الطاقة الشمسية على الشبكة قد تنتج كمّيّات متزايدة من الطاقة خلال النهار، ما يخفّض حجم الطلب الإجمالي خلال النهار؛ حيث يشكّل هذا التخفيض بطن البطة، خاصّةً في يوم من أيام الربيع الجميلة من شهر أبريل، عندما يكون الطقس منعش جدًّا، ولا يحتاج إلى مكيّف للهواء، ولكنّه مشمس بدرجة كافية لتوليد الطاقة من الألواح الشمسية. كان بطن البطة يزداد عمقًا في منتصف النهار، ولكنّ إنتاج الطاقة الشمسية ينخفض في المساء بعد غروب الشمس عندما يعود الملايين من سكان كاليفورنيا إلى منازلهم من العمل ويزداد في الوقت ذاته الطلب على الطاقة مشكلًا بذلك رأس البطة. ومع ذلك كلّه، توقّعت كاسيو أحد أمرين بحلول عام 2020م؛ فإما أن يتشكّل "إنحناء" ضخم، أو أن يحدث تغيير في الإنتاج من جميع المولدات الأخرى غير الشمسية التي تزيد طاقتها على 13000 ميغاواط في المساء.

تحقّقت توقّعات كاسيو كما اتضح فيما بعد. ولكنّ ذلك حدث في عام 2017م وليس في عام 2020م ما جعل الأمر أكثر سوءًا. أما السبب الذي يجعل منحنى البطة يمثّل هاجسًا لمشغّلي الشبكة فهو أنّه يفرض مطالب مرهقة ومدمّرة على المولّدات غير الشمسية التي تخدم الشبكة. ومن أجل تلبية متطلّبات الإنحناء من بطن البطة إلى رأسها، فلا بد من وجود جيش من محطات توليد الطاقة التي تعمل في الغالب بالغاز الطبيعي، التي تظل في مرحلة ركود حتى وقت متأخّر بعد الظهر، حيث يتعيّن عليها جميعًا البدء في ضخّ التيار الكهربائي في الشبكة بسرعة. وهذا الاستخدام غير الفعّال للموارد مكلف، ما يستلزم وضع أسطول من المولدات في وضع الاستعداد إلى حين الحاجة إليها. أما تكرار هذه الدورة كلّ يوم فيؤدّي إلى الاستهلاك والتلف في محطات الطاقة التي تكون أكثر راحة إذا كان إنتاجها ثابتًا أو بتغييرات بسيطة57. بالتأكيد أن أيًّا من هذه التكاليف لا تظهر في السعر الملصق على الألواح الشمسية، ومع ذلك فإنّ الطاقة الشمسية تفرضها على الشبكة. لذلك، تهدف العديد من الدراسات إلى تحديد هذه التكاليف، أما التقدير النموذجي لها فهو أنّ الطاقة الشمسية تصبح أكثر كلفة بنسبة تصل إلى 50٪ عندما تؤخذ بالحسبان التكاليف الإضافية لدمجها في الشبكة58.

تظهر مشكلات أخرى عندما تصبح البطة أكثر بدانة وطولًا؛ حين ينخفض بطن البطة من الحمل المتبقي بعد استخدام الطاقة الشمسية المنتجة بالكامل، ويصل إلى ما دون مستوىً معيّن، حيث يتعيّن إيقاف تشغيل محطات الطاقة الأخرى التي تكون أقلّ مرونة بكثير من محطات الغاز الطبيعي. لدى ولاية كاليفورنيا القليل من هذه المصانع الأخرى وهذا لا يسبب لها أي قلق؛ لأنّ الولاية تعتمد بشكل كبير على محطات الغاز الطبيعي، وبالكاد تستخدم طاقة تولّدها من مصدر طاقة الفحم، وهي في طريقها لإغلاق آخر مفاعلاتها النووية. ولكن في أماكن أخرى، غالبًا ما تعتمد شبكات الطاقة على الفحم والمحطات النووية للحصول على جزء كبير من طاقة "التحميل الأساسي" التي يمكن الاعتماد عليها. ولا شك في أن إيقاف هذه المحطات وتشغيلها لغايات استيعاب الطاقة الشمسية الزائدة على الشبكة، عملية مكلفة ومعرقلة.

من الممكن في بعض الأحيان أن تنعكس المشكلات التي تسبّبها الطاقة الشمسية للمولدات الأخرى على الطاقة الشمسية نفسها. وإذا ثبت أن من المستحيل أو من غير الاقتصادي إغلاق محطات الحمل الأساسي، فقد يضطر مشغلو الشبكة إلى تقليص الطاقة الشمسية الزائدة أو التخلص منها، وسيكون ذلك غالبًا من دون تعويض. وقد حدثت هذه المشكلة في ولاية كاليفورنيا في عام 2017م عندما تعرّضت الولاية لعاصفة قوية، فقد تسبّبت الأمطار الغزيرة بعد جفاف طويل في فيضان خزّانات الولاية، فشغّلت التوربينات الكهرومائية بسرعتها الكاملة، ما تسبب في زيادة الطاقة الكهرومائية جنبًا إلى جنب مع فائض الطاقة الشمسية. وأدّت زيادة الإنتاج إلى زيادة في العرض الزائد أساسًا، لدرجة أنّ كاسيو حذّرت من أنّها قد تضطر إلى التخلّص من ثلث الكهرباء التي تنتجها الألواح الشمسية على مستوى الولاية59.

تتلقى مولدات الطاقة الشمسية في كاليفورنيا مبالغ مالية حتى في حال عدم استخدام الطاقة التي تنتجها، وذلك على عكس الصين التي لا تُدفع أجور المولدات الشمسية تقليديًّا عندما يُقلّص مشغل الشبكة الإنتاج؛ فقد تمّ تقليص ما يقرب من 10٪ من إجمالي الطاقة الشمسية في الصين عام 2016م، وتجاوزت النسبة 30٪ في بعض المقاطعات. ولكن الأمور60 تحسّنت قليلًا مع مرور الوقت، حيث أمرت الحكومة الصينية مرافقها العامة في عام 2016م بتعويض مالكي الطاقة الشمسية ولو بشكل جزئي عن تقليص الإنتاج. أما في أوروبا فقد تبدو الطاقة الشمسية في مأزق؛ حيث كانت مولدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح تتمتع في السابق بميزة تُعرف باسم "أولوية الإرسال priority dispatch "، التي يتعيّن بموجبها على المولّدات الأخرى إيقاف التشغيل أولًا إذا كانت الشبكة تعاني زيادة في إمدادات الطاقة. لكن الاتحاد الأوروبي أعلن في عام 2016م عن قواعد جديدة تلغي إعطاء مصادر الطاقة المتجدّدة أولوية الإرسال، وضمّها إلى إجراءات تقليص الانتاج61 . لكن هذه القواعد لم تحسم مسألة ما إذا كان مالكو الطاقة الشمسية سيتقاضون رواتبهم إذا قُلِّص الإنتاج؛ فبصرف النظر عمن يدفع الفاتورة، فإنّ التقليص يؤدّي إلى تكاليف، ويزداد الوضع سوءًا مع ارتفاع انتشار الطاقة الشمسية.

وبالإضافة إلى فرض التكاليف على الشبكة، فإنّ زيادة انتشار الطاقة الشمسية يمكن أن تجعل الشبكة أقلّ موثوقية؛ حيث تواجه كاليفورنيا تحدّيات حقيقية في دمج الطاقة المتجدّدة المتقطعة، ولكن كاسيو تقلق عند انتشار طاقة الرياح والطاقة الشمسية بنسبة 60٪ من إمكانية إغلاق الشبكة بالكامل إذا تعطلت إحدى محطات الطاقة التقليدية التي تعمل بالوقود الأحفوري. وقد يبدو مستوى 60٪ بعيد المنال، لكن هدف كاليفورنيا هو الحصول على 50٪ من الطاقة المتجدّدة التي يُحتمَل أن يأتي نصفها على الأقلّ من الطاقة الشمسية بحلول عام 2030م، وعلى 60٪ بعد ذلك بوقت قصير62.

حقّقت الشبكة تاريخيًّا نسبة من الموثوقية من خلال خاصّية تسمّى "القصور الذاتي inertia ". وتعمل محطات الطاقة التقليدية جميعها بشكل أساسي وفقًا للمبدأ ذاته؛ حيث تُستخدم الحرارة الناتجة من حرق الوقود الأحفوري (أو انشطار الوقود النووي) في تدوير عمود يدير مولّدًا كهربائيًّا؛ بينما المولّدات التقليدية جميعها المتصلة بالشبكة لها محرّكات ثقيلة تدور بالسرعة ذاتها بالضبط، مع الحفاظ على تردّد الطاقة المتدفّقة عبر الشبكة قريبًا جدًّا من درجة 60 هيرتز. وعند تعطّل أحد المولّدات وحدوث تهديد بسحب تردد الشبكة بالكامل، يتم تلافي ذلك عن طريق خاصّية القصور الذاتي التي تُبطّئ عملية تغيير التردّد، وتمنح مشغّلي الشبكة الوقت لإعادة التوازن وسدّ الفجوة في توليد الطاقة. لكنّ الطاقة الشمسية لا تحتوي على أجزاء متحرّكة؛ بمعنى أنّها لا تعاني القصور الذاتي. لذا فإنّ الشبكة التي تهيمن عليها الطاقة الشمسية يمكن أن تكون في خطر متزايد من توقّف التيار؛ بسبب عدم وجود آلية الأمان المدمجة التي يوفّرها القصور الذاتي للشبكة التقليدية.

يمكن أن يتسبّب ارتفاع مستويات الطاقة الشمسية في إحداث المزيد من المشكلات على الشبكة على المستوى المحلي والعالمي؛ فإذا ركّب عدد كبير جدًّا من مالكي المنازل في حي معيّن ألواح الطاقة

الشمسية على أسطح منازلهم، وحاولوا بيعها للشبكة، فسيتسبّب ذلك في زيادة الجهد على دوائر التوزيع المحلية التي صُمِّمت لنقل الطاقة من الشبكة إلى المستهلكين، وليس العكس. وإذا حدث تذبذب مؤقت في تدفّق الطاقة الكهربائية على إحدى هذه الدوائر، فإنّ محوّلات تيار الألواح الشمسية الموجودة على السطح والتي تربطها بالشبكة يمكن أن تغلق دفعة واحدة، ما يتسبّب في انقطاع التيار الكهربائي على عكس ما يقوم به نظام التصحيح الذاتي.63يمكن أن يؤدّي الإفراط في استخدام الطاقة الشمسية على المستوى العالمي إلى حدوث طفرات مفاجئة لا يمكن لشبكة الطاقة في بلد ما التعامل معها، ويتعيّن عليها نقلها عبر حدود دولية. على سبيل المثال، تذمّرت الدول المجاورة لألمانيا (المجر وبولندا وجمهورية التشيك وسلوفاكيا) من أنّ فائض الطاقة غير المتوقع من ألمانيا قد ألحق الضرر بكفاءة أداء شبكاتها.

هذه المشكلات كلها مزعجة للغاية وتظهر مع حركة صعود الطاقة الشمسية. وقد عانى من هذه القضايا حتى الآن عدد قليل من الأسواق العالمية، ومن أبرزها أسواق كاليفورنيا وألمانيا. ولكن إذا كان الهدف زيادة نسبة انتشار الطاقة الشمسية حول العالم، فستُفرض تكاليف اقتصادية وتقنية على شبكات الطاقة في كلّ مكان.

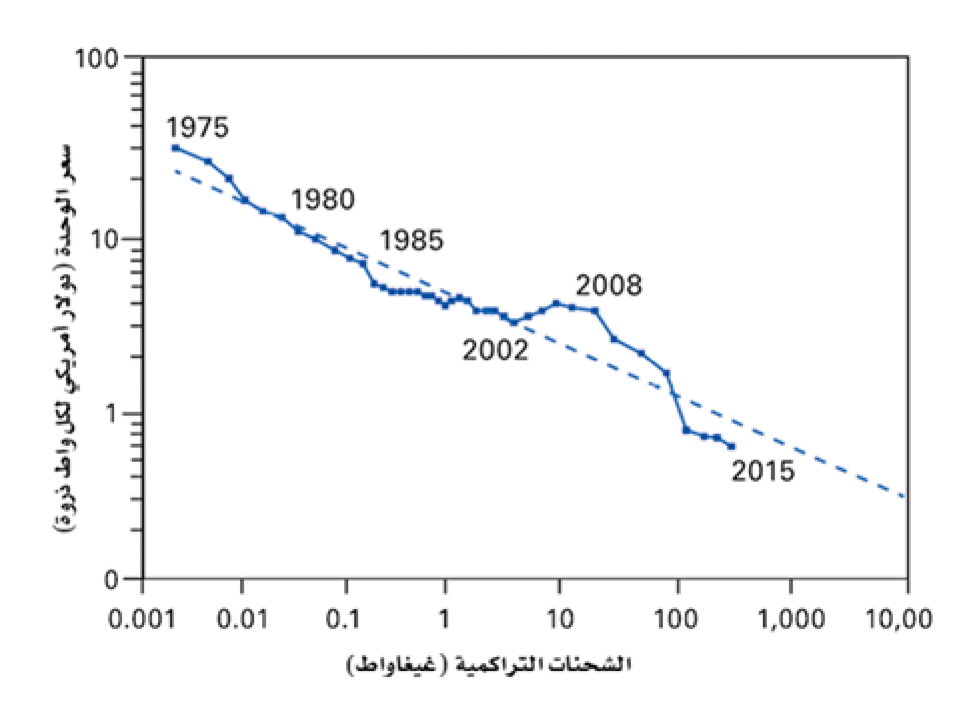
الحاجة أم الابتكار

قد تبدو هذه المجموعة من العوائق مخيفة ما يجعلها تحول دون صعود الطاقة الشمسية، لكن لا يستعصي حلّ أيّ منها؛ فما تحتاجه الطاقة الشمسية للتغلّب على كلّ واحدة هو الابتكار؛ إذ يمكن أن يجذب ابتكار النماذج المالية والتجارية مبالغ هائلة من الاستثمار في الطاقة الشمسية، وتجنّب أزمة رأس المال. ويمكن أن يضمن الابتكار التقني والنظامي بقاء تكلفة الطاقة الشمسية أقلّ من القيمة التي توفّرها، حتى مع توافر المزيد من الطاقة الشمسية.

يمكن لابتكار النماذج المالية والتجارية أن يوسّع انتشار تقنية ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية الحالية على المدى القريب. إن طرق التمويل الجديدة (التي يُرجّح أنها جاءت من قطاعات أخرى، ولكنّها جديدة في مجال تمويل مشاريع الطاقة المتجدّدة) يمكنها أن تسهل على شركات الاستثمار ضخّ مبالغ ضخمة من رأس المال في الطاقة الشمسية. ومن الممكن أن تعمل نماذج الأعمال الجديدة -خاصّة في أكثر أجزاء العالم فقرًا- على إيصال الطاقة الشمسية إلى الأماكن التي لا تصلها شبكات الطاقة التقليدية.

إنّ المزيد من الاستثمار يساعد في توسّع أكبر لمشاريع الطاقة الشمسية حول العالم، وستكون أبرز نتائج التوسع الانخفاض المستمر في تكلفة إنتاج هذا الطاقة، حيث سيؤدّي نشر الطاقة الشمسية المتزايد إلى زيادة الطلب على إنتاج أكبر للألواح الشمسية، ما سيقلّل تكلفة إنتاجها. كما يوضّح الشكل (3.5) صارت الألواح الشمسية رخيصة مع زيادة الإنتاج في جميع أنحاء العالم، ما مكّن

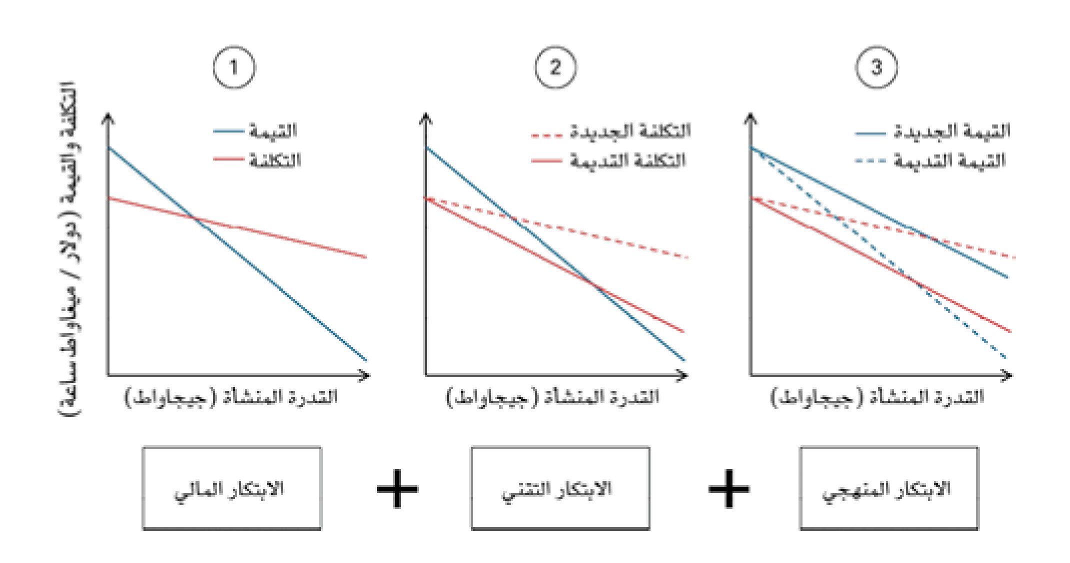
منتجي الألواح من خفض تكاليفهم من خلال الاستفادة من وفورات حجم الإنتاج وشحذ عمليات التصنيع. ومع نشر المزيد من مشاريع الطاقة الشمسية في منطقة ما، سيصبح تشغيل مشروع آخر أرخص؛ لأنّ الشركات المحلية ستتعلّم تقليل تكاليف تثبيت المشاريع الجديدة والسماح بها64. لذلك، إذا كان تدفّق الاستثمار يمكن أن يدعم نشر الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم، فيجب أن تستمر تكاليف الطاقة الشمسية في الانخفاض. ومن خلال تسهيل الاستثمار في الطاقة الشمسية على أكبر المستثمرين في العالم، يمكن أن يفتح ابتكار النماذج المالية والتجارية المجال لصنع حلقة حميدة حيث ستؤدّي التدفّقات الاستثمارية الأكبر إلى القطاع إلى خفض تكلفة الطاقة الشمسية، ما سيجعل الاستثمار في الطاقة الشمسية أكثر جاذبية.



الشكل (3.5): انخفاض أسعار الألواح الشمسية الكهروضوئية في الماضي والمتوقعة. يعرض هذا الرسم البياني انخفاض سعر الألواح الشمسية الكهروضوئية بمرور الوقت (المحور الصادي لوغاريتمي؛ لذا فإنّ الخط المستقيم هو في الواقع انخفاض أسي في التكلفة مع مرور الوقت). من عام 1975م إلى عام 2015م انخفض سعر الواط للوحة الكهروضوئية الشمسية بنسبة 18٪ تقريبًا لكلّ مضاعفة للإنتاج التراكمي. يشير استقراء الخط الذي يتناسب مع البيانات التاريخية حتى عام 2015م إلى أنّ الألواح الكهروضوئية الشمسية يمكن أن تنخفض إلى أقلّ من 0.25 دولار/واط بعد إنتاج ما يقرب من 10000 جيجاواط من الألواح بشكل تراكمي.
المصدر: تمت إعادة طباعة الشكل بإذن من Sivaram and Kann (2016).

ولكنّ هذا قد لا يكون كافيًا؛ حيث إنّ جعل تقنية السيليكون للطاقة الشمسية الكهروضوئية أرخص اليوم من خلال نشر المزيد منها، سيؤدّي إلى تقدّم مهم نحو هدف منتصف القرن للطاقة الشمسية الذي يتمثّل في تزويد ثلث الكهرباء في العالم. ومع ذلك، وبمعزل عن مصادر الطاقة الأخرى، فإنّ تكلفة الطاقة الشمسية لا تذكر عندما يتعلق الأمر بتحديد ما إذا كان تركيب المزيد منها اقتصاديًّا أم

لا. كما توضّح اللوحة (1) على يسار الشكل (3.6)، فحتى لو استمرّت تكلفة الطاقة الشمسية في الانخفاض نتيجة لزيادة الانتشار، فقد تنخفض قيمتها بشكل أسرع. وسبب ذلك هو لأنه كلّما رُكِّب المزيد من ألواح الطاقة الشمسية، انخفضت الحاجة إلى الكهرباء التي تولدها في منتصف النهار. يضاف إلى ذلك أن المستويات المرتفعة من الطاقة الشمسية تؤدي إلى إجهاد بقية النظام الكهربائي، ما يؤدّي إلى فرض تكاليف، أو، على نحو مكافئ، خفض قيمة الطاقة الشمسية.



الشكل (3.6): كيف يمكن لثلاثة أنواع من الابتكارات أن تحافظ على الجاذبية الاقتصادية للطاقة الشمسية. توضّح هذه الرسوم البيانية الثلاثة أثر الابتكار في متوسّط التكلفة العالمية وقيمة الوحدة التالية من كهرباء الألواح الكهروضوئية الشمسية حين يزداد إجمالي السعة الكهروضوئية الشمسية المركبة في جميع أنحاء العالم.

قد لا يكون من المنطقي في مرحلة ما تثبيت مشروع آخر للطاقة الشمسية؛ لأنّ الكهرباء التي سيولّدها ستكون أقلّ من تكلفة المشروع نفسه. وقد نشرت أنا وشايل خان حسابًا تقريبيًّا يشير إلى أنه إذا كانت الطاقة الشمسية الكهروضوئية تلبّي 30٪ من الطلب على الكهرباء، فيتعين خفض تكلفة مزرعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المثبتة بالكامل على نطاق المرافق إلى 25 سنتًا لكلّ واط لتبقى اقتصادية. لقد خلصنا إلى أنّ من غير المرجح أن المشاريع القائمة على الألواح الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون قد تحقّق ذلك الهدف65. وأنا لا أعني أن التقنية الحالية ليس لديها فرصة لتحقيق هذا الهدف؛ حيث تتوقّع شركة بلومبرج أنّ تكلفة الطاقة الشمسية يمكن أن تنخفض بمقدار الثلثين بحلول عام 2040م. وهذا قريب جدًا من انخفاض ثلاثة أرباع الذي نتوقّع أنّ الطاقة الشمسية سوف تحتاج إلى تحقيقه. لكنّ أفضل الأدلة المتاحة اليوم تشير إلى وجود احتمال قوي بأنّ تكلفة الكهرباء من تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية الحالية لن تنخفض بسرعة كافية لتظل أدنى من قيمتها بالتزامن مع ارتفاع انتشار الخلايا الشمسية.

هنا يأتي دور الابتكار التقني، حيث يحرز العلماء، في المختبرات حول العالم، تقدّمًا في تطوير الطلاءات الكهروضوئية عالية الكفاءة المصنوعة من عناصر غير مكلفة للغاية. ولا يمكن أن تكون هذه الطلاءات أرخص من الألواح الشمسية القائمة على تقنية السيليكون الحالية فحسب، ولكنّها تُقلّل أيضًا من حجم المساحة والمعدات والعمالة والتكاليف الأخرى المرتبطة بالتركيب. وكما توضّح اللوحة (2) من الشكل (3.6)، أنه في حال اكتسبت هذه التقنيات الكهروضوئية قوّة شرائية في السوق، فيمكنها تقليل -وبشكل حاد- تكلفة الكهرباء التي يتمّ توليدها من مشاريع الطاقة الشمسية، وستكون وتيرة انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية حينها أسرع بكثير من الانخفاضات الطفيفة الناتجة من زيادة نشر التقنية الحالية. وعليه، يمكن تركيب المزيد من الطاقة الشمسية قبل أن يدرك تراجع قيمة الكهرباء التكلفة المنخفضة للألواح الشمسية.

ومع ذلك، فحتى التقنيات الأكثر تطوّرًا للطاقة الشمسية الكهروضوئية لن تولّد الكهرباء إلا بمقدار ضوء الشمس المتوافر -لذلك فستظلّ قيمة الكهرباء تنخفض بسرعة نتيجة لزيادة انتشار الطاقة الشمسية. ومن حسن الطالع، يمكن للتقنيات الجديدة الأخرى (بالإضافة إلى نوع ثالث من الابتكار- الابتكار النظامي) أن توقف القيمة المتدهورة للطاقة الشمسية. توضّح اللوحة (3) الأثر المشترك لجميع أنواع الابتكار الثلاثة في تكلفة وقيمة الكهرباء الناتجة من تركيبات الألواح الشمسية. وبالإضافة إلى انخفاض التكلفة المتسارع الذي تم ترحيله من اللوحة (2)، فإن القيمة في اللوحة (3) تنخفض بسرعة أقلّ، بحيث تظلّ التكلفة أقلّ من القيمة بصرف النظر عن كمّيّة الطاقة الشمسية التي يتمّ نشرها. تظل الجاذبية الاقتصادية للطاقة الشمسية في هذه الحالة قوية حتى مع زيادة انتشارها. والأهم من ذلك، لاحظ أنّ الخط الجديد المنحدر برفق الذي يشير إلى قيمة الطاقة الشمسية في اللوحة (3)، سيظلّ يتقاطع مع خط التكلفة الأصلي من اللوحة (1) في حال رُكِّبت خلايا شمسية كافية. بعبارة أخرى، فإنّ الابتكار النظامي وحده من دون الابتكار التقني غير كافٍ. والعبرة من ذلك أنّ الأنواع الثلاثة للابتكار كلّها ضرورية لجعل التكاليف تنخفض بدرجة أسرع، والقيمة تنخفض بشكل أبطأ، ومن ثم ضمان أن تظلّ التكلفة أقلّ من القيمة مع زيادة انتشار الطاقة الشمسية.

والسؤال هنا هو: كيف يمكن التغلب على انكماش القيمة وتركيب المزيد من الطاقة الشمسية في الوقت ذاته؟ أولًا، بالإضافة إلى الطلاءات الكهروضوئية الرخيصة، يمكن أن يقدّم الابتكار التقني تقنيات شمسية جديدة تتميّز بوحدات مدمجة قادرة على تخزين الطاقة، من أجل تحويل ضوء الشمس المتقطع إلى مصدر ثابت للطاقة. على سبيل المثال، يستطيع الجيل الثاني من محطات الطاقة الشمسية المركزة التي تحوّل أشعّة الشمس إلى حرارة تخزين هذه الحرارة طوال الليل لتوليد الكهرباء على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع بكفاءة وبتكلفة زهيدة. ويمكن أن تخزّن تقنيات أخرى ضوء الشمس على شكل وقود لتحلّ محلّ الوقود الأحفوري في الأنشطة التي لا تستخدم الكهرباء. وسيكون القيام بذلك ضروريًّا لتحقيق الهدف طويل المدى وتوفير غالبية حاجات البشرية من الطاقة الشمسية في وقت ما من هذا القرن.

ومع ذلك، من المحتمل أن تظلّ الطاقة الكهروضوئية الشمسية المتقطعة هي الطريقة الرائدة لتسخير ضوء الشمس في المستقبل المنظور. وهذا يعني أنّ الابتكار النظامي -أي إعادة تشكيل الأنظمة التي يتم دمج الخلايا الشمسية الكهروضوئية فيها- سيكون ضروريًّا لمنع قيمة الطاقة الشمسية من الانهيار مع زيادة الانتشار. لكن، يتعين أن يبدأ هذا الابتكار بشبكات الطاقة في المقام الأول، وهي غير مجهّزة حاليًا بشكل جيّد للتعامل مع الناتج المتقلّب من الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وسيكون من السهل على شبكات الطاقة الأكبر حجمًا توفير إمدادات الطاقة الشمسية المتقلبة من مصادر متنوّعة حسب الحاجة. ويمكن شحن الفائض من الطاقة الشمسية في وقت معين من الشبكة وإعادة استخدامها في وقت أخر عندما يكون الطلب عليها أعلى. ويمكن للشبكات الأكثر ذكاءً أن تنبّه مستهلكي الكهرباء إلى ترشيد استهلاك منازلهم وأعمالهم باستمرار لتتناسب بشكل أفضل مع إنتاج الطاقة الشمسية.

ولدعم القيمة المتدهورة للخلايا الكهروضوئية الشمسية، سيتطلب الأمر ربط شبكة الطاقة المحدّثة هذه بمزيج متنوّع من محطات الطاقة ومصادر تخزينها، وستحتاج الطاقة الشمسية نفسها إلى أن تصبح متوائمة أكثر داخل الشبكة. ويمكن للمحوّلات الذكية التي تربط الطاقة الشمسية بالشبكة إعادة خلق حالة القصور الذاتي التي تفشل الألواح الشمسية اليوم في توفيرها للشبكة66. أضف إلى ذلك أنّ محطات الطاقة الموثوقة والخالية من الكربون، مثل المفاعلات النووية والمحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري التي تلتقط انبعاثات الكربون وتخزّنها، تستطيع تعديل إنتاجها من الطاقة للتعويض عن التقلبات في الطاقة الشمسية. وقد يواجه نشر محطات الطاقة النووية والوقود الأحفوري عقبات سياسية واقتصادية وتقنية؛ لذلك، فإنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية ستعتمد أيضًا على تقنيات مختلفة؛ مثل البطاريات والخزّانات الكهرومائية؛ لتخزين طاقتها للوقت الذي تكون الحاجة إليها مُلحّة.

يتمثّل العنصر الأخير للابتكار النظامي لمواجهة انكماش القيمة في تكامل القطاعات التي لم تستخدم الكهرباء تقليديًّا، مثل قطاعي النقل والتدفئة؛ حيث يمكن تغيير تلك القطاعات لتستمد بعض حاجاتها من الكهرباء بدلًا من حرق الوقود الأحفوري.67 على سبيل المثال، يمكن أن تعمل أساطيل السيارات الكهربائية الموصولة بالشبكة بوصفها بطاريات متنقلة لتخزين الطاقة الشمسية وتقليص منحنى البطة السمينة.68 ولا تنتهي الاحتمالات عند هذا الحدّ على الإطلاق؛ ففي الواقع، ومع تزايد ندرة المياه العذبة نتيجة لتغيّر المناخ، يمكن أن تضرب عملية تحلية المياه بالطاقة الشمسية عصفورين بحجر واحد، ما يوفر المياه العذبة وتخزين الطاقة الشمسية الزائدة على شكل ماء.

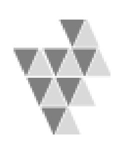
هذه الأمثلة كلّها على الابتكار النظامي يمكن أن تدعم قيمة الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية الوفيرة بشكل متزايد. لكن، لا تُعدّ هذه حلولًا سحرية لهذه المشكلة. مثلاً، على الرغم من كلّ الضجيج حول انخفاض تكلفة بطاريات الليثيوم-أيون (البطاريات ذاتها المستخدمة في الهواتف المحمولة والمركبات الكهربائية لتمدّها بالطاقة، التي تُستخدَم الآن بشكل متزايد لدعم شبكة

الطاقة)، إلا أن تخزين البطاريات لا يزال يشكل قرابة 1٪ من إجمالي تخزين الطاقة على الشبكات حول العالم، وما تبقى هو في الغالب يأتي على شكل منشآت الطاقة الكهرومائية التي كانت موجودة منذ عقود، وتخزن الطاقة عن طريق ضخّ المياه عبر السدود69. زد على ذلك، أنّ البطاريات تُعدّ جيدة في تخفيف الفروقات قصيرة المدى في إنتاج الطاقة الشمسية، لكن جدواها الاقتصادية ووظائفها غير مناسبة لتخزين الطاقة لفترات أكثر من بضع ساعات، هذا فضلًا عن أنّ إنتاج الطاقة الشمسية يختلف بشكل كبير حسب الموسم. لذلك، وعلى الرغم من أنّ استخدام البطاريات قد ينمو بسرعة، إلا أنها ستكون مجرد جزءًا من الحلّ لمواجهة الانكماش في قيمة الطاقة الشمسية.

كما أنّ الابتكار النظامي محدود أيضًا في مدى قدرته على الحفاظ على قيمة الطاقة الشمسية. وقد اقترحت إحدى الدراسات عددًا من الإستراتيجيات التي تساعد في محاربة انكماش القيمة من خلال التنبؤ بمستقبل شبكة ولاية كاليفورنيا من خلال منظور وردي ومتفائل. لقد افترض سيناريو الدراسة "الطموحة للغاية" أن تكلفة التخزين ستنخفض بنسبة 80٪ أسرع مما كان متوقعًا بحلول عام 2030م، وأنّ المستهلكين سيستجيبون تلقائيًّا للتغيير الفوري لأسعار الطاقة التي تحدّدها المرافق؛ من أجل مواءمة الطلب على الكهرباء بشكل أفضل مع تقلب إمدادات الطاقة الشمسية. ووجد الباحثون أنّ أقلّ من نصف انكماش القيمة الناتج من ارتفاع انتشار الطاقة الشمسية سوف يختفي70. لذلك، فمن دون الابتكار التقني لجعل الطاقة الشمسية الكهروضوئية أرخص بكثير، قد لا يكون الابتكار النظامي كافيًا لمنع قيمة الطاقة الشمسية من الانخفاض إلى ما دون سعر التكلفة.

إذن، فإنّ الإستراتيجية الأكثر أمانًا هي المراهنة على أنواع الابتكار الثلاثة جميعها، مع إدراك أنّ لكلّ منها دورًا مهمًّا في خفض تكاليف الطاقة الشمسية، والحفاظ على قيمتها، وضمان استمرار ارتفاعها من دون انقطاع. والخبر السار في ذلك أنّه يبدو أن ابتكار النماذج المالية والتجارية يحرز تقدّمًا سريعًا؛ لذا من الجيد أن تساعد رؤوس الأموال الضخمة من الاستثمارات الجديدة في دفع حركة التقنية الحالية إلى الأمام. ويمكن أن يفيد هذا الإنجاز أيضًا التقنيات الجديدة التي -بمجرّد أن تنضج ويمكن تسويقها- يمكن أن تتمتع بسهولة الوصول إلى الأسواق المتطوّرة والمستثمرين على حدّ سواء.

لكن الخبر السيئ هو أن الابتكار التقني والمنهجي لا يزالان يسيران ببطء. وينطبق هذا بشكل خاص على الابتكار التقني الذي يتطلّب ازدهاره استثمارات ضخمة من كلّ من الحكومات والشركات الخاصّة. وكذلك الابتكار المنهجي الذي يحتاج من صانعي السياسات في جميع أنحاء العالم إلى عمل شيء؛ على سبيل المثال، من خلال الاستثمار في ترقية شبكات الطاقة وإعادة صياغة اللوائح لتشجيع مجموعة متنوّعة من المصادر الخالية من الكربون للتكامل مع الطاقة الشمسية. فإذا تمكّنوا من حشد الإرادة السياسية للاستثمار في أشكال الابتكار الثلاثة جميعها، فإنّ المستقبل المشرق ينتظرهم؛ حيث تصبح الطاقة الشمسية مصدر الطاقة الأساسي للبشرية.



الجزء الثاني تعليم التقنية القديمة حيلًا جديدة

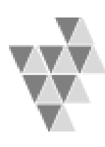
المحاور الرئيسة

● إن التوسّع في نشر الألواح الشمسية الكهروضوئية الحالية يمكن أن يصل إلى منتهاه وهو لم يستطع تحقيق هدف منتصف القرن المتمثّل في توفير ثلث حاجات الطاقة العالمية. لكن، وبينما تظهر التقنيات الجديدة وتتوسّع، فإنّ التقنيات الحالية يمكن أن تحقّق تقدّمًا كبيرًا نحو الهدف في العقد المقبل، وهو توفير نسبة جيدة (مكوّنة من رقمين) من الطلب العالمي على الكهرباء؛ فابتكارات النماذج المالية والتجارية تسير على الطريق الصحيح لتحقيق ذلك.

● لكي تنمو القدرة الكهروضوئية الشمسية المركبة من حيث الحجم، فإنّها ستحتاج إلى مبالغ ضخمة من الاستثمارات الرأسمالية الجديدة؛ أي بحجم تريليونات عدة من الدولارات. وتُعدّ هذه المبالغ ضئيلة ولا تذكر؛ أي مصروفات جيب بالنسبة للمستثمرين المؤسّسيين الأثرياء؛ مثل صناديق التقاعد أو التأمين. يقدّم الفصل الرابع، "مطاردة رأس المال"، تقريرًا عن كيفية بدء صناعة الطاقة الشمسية في تطبيق الهندسة المالية المستخدمة في تمويل السيارات، والمنازل، وخطوط أنابيب النفط، التي يمكن أن تموّل مشاريع الطاقة الشمسية من الأحجام جميعها. وقد قامت شركات كبيرة معروفة تاريخيًّا بامتلاكها لمحطات طاقة تعمل بالوقود الأحفوري، بإعادة صياغة نماذج أعمالها من أجل استهداف الطاقة الشمسية؛ حيث تعمل بوصفها قنوات لضخّ رأس مال المستثمرين الوافر نحو المشاريع الأكثر ربحية. ويمكن للسياسة العامة تسريع هذه الأنشطة من خلال توفير حوافز أو ضمانات جاذبة للمستثمرين المتردّدين، لكن على الحكومات تجنّب الاستمرار في تقديم هذه الحوافز على المدى البعيد.

● بالإضافة إلى ذلك، تستعد تقنيات الطاقة الشمسية الحالية لإحراز تقدّم في واحد من أكثر التحدّيات صعوبة ويعيق التنمية الاقتصادية: وهو الوصول إلى الطاقة؛ فلا يزال أكثر من مليار شخص في جميع أنحاء دول أفريقيا جنوب الصحراء وكذلك في جنوب آسيا يفتقرون إلى الكهرباء. بالمقابل، يطوّر روّاد الأعمال نماذج الأعمال المبتكرة لجذب أكبر عدد ممكن من عملاء الكهرباء الجدد، وذلك من خلال إنتاج ألواح كهروضوئية قليلة الثمن، وأجهزة منزلية أكثر كفاءة في استخدام الطاقة، ونشر الهواتف المحمولة في كلّ مكان تقريبًا. يقدّم الفصل الخامس، "من الأعمال الخيرية إلى الأعمال الربحية"، لمحة عن بعض الشركات الناشئة الذكية، من شرق إفريقيا إلى الهند، التي تُسوِّق الطاقة الشمسية خارج الشبكة ويمكن للقرويين دفع ثمنها عن طريق هواتفهم الخلوية. ومن الممكن

في بعض الحالات أن تعمل الخلايا الشمسية الكهروضوئية خارج الشبكة على تشغيل الشبكات المصغّرة التي تربط قرىً بأكملها، ويمكن في يوم من الأيام أن تُربط بالشبكة الرئيسة في حال وصلت بالفعل. ونكرر مرة أخرى أنه يجب على صانعي السياسات الحرص على عدم التبعية للسياسات العامة، وأن تكون أولوية العمل هو أن تفسح الحكومات الطريق أمام الابتكار الخاص المفعم بالحياة.



الفصل الرابع مطاردة رأس المال

خلال النصف الأول من عام 2015م، بدت شركة صن إديسون SunEdison وكأنّه لا يمكن إيقافها؛ فقد ركبت هذه الشركة، المطورة لمشاريع الطاقة الشمسية الضخمة على نطاق المرافق، موجة التوسّعات في أسواق الطاقة المتجدّدة في جميع أنحاء العالم. وعلى مدى العقد الماضي، ارتفع حجم الطاقة الشمسية المُثبّتة على مستوى العالم من 4 جيجاوات فقط إلى ما يقرب من 200 جيجاوات. ومع ذلك فقد تجاوزت الطاقة الشمسية للتو عتبة الواحد بالمئة من حصّة توليد الكهرباء في العالم، ما بشّر بعقود من النمو في المستقبل1.

وإدراكًا منها لحاجة السوق المتنامية، وقّعت صن إديسون عقودًا حول العالم، امتدادًا من آسيا إلى إفريقيا إلى أمريكا اللاتينية؛ لبناء مزارع شمسية ضخمة. ودخلت بين عامي 2014م و2015م في حملة شراء شرهة، حيث أنفقت ما يقرب من 5 مليارات دولار من أجل الاستحواذ على مطوّر عالمي لطاقة الرياح وشركة أمريكية رائدة في مجال تركيب الطاقة الشمسية على الأسطح. وردد المحللون الماليون ما قاله المسؤولون التنفيذيون في صن إديسون الذين أطلقوا على الشركة اسم "العملاق" الثاني (****)supermajor في مجال الطاقة2. كان هذا الوصف خياليًا، لكن ليس مبالغة كبيرة؛ فقد بلغت القيمة السوقية للشركة ذروتها في يوليو من ذلك العام، وتجاوزت 9 مليارات دولار3. وكان الرئيس التنفيذي للشركة أحمد شاتيلا يضع نصب عينيه شركة إكسون Exxon؛ أكبر شركة نفط في العالم، معلّقًا: "تبلغ قيمتها السوقية قرابة 400 مليار دولار. هذا ما نسعى إليه"4.

في ربيع عام 2015، دعوت شاتيلا لمشاركة رؤيته العظيمة للمستقبل في مأدبة غداء مستديرة في مجلس العلاقات الخارجية حيث ألقى خطابًا متفائلًا وملهمًا. سألته بعد ذلك عن السبب الذي جعل الشركة تتجه نحو تمويل وبناء مشاريع باستخدام الألواح الشمسية الجاهزة بدلًا من تطوير تقنية جديدة للطاقة الشمسية. فاجأني ردّه نظرًا إلى أنه كان مهندسًا متمرّسًا ولديه خبرة طويلة في مجال صناعة الرقائق الدقيقة التي استغرقت أبحاثًا مكثّفة في وادي السيليكون. أكّد لي أنّ الخروج من أعمال تصنيع الطاقة الشمسية كان أفضل قرار اتخذه على الإطلاق؛ لأن مجال الهندسة التقنية للألواح الشمسية لم يكن بالقيمة التي كان يطمح إليها.

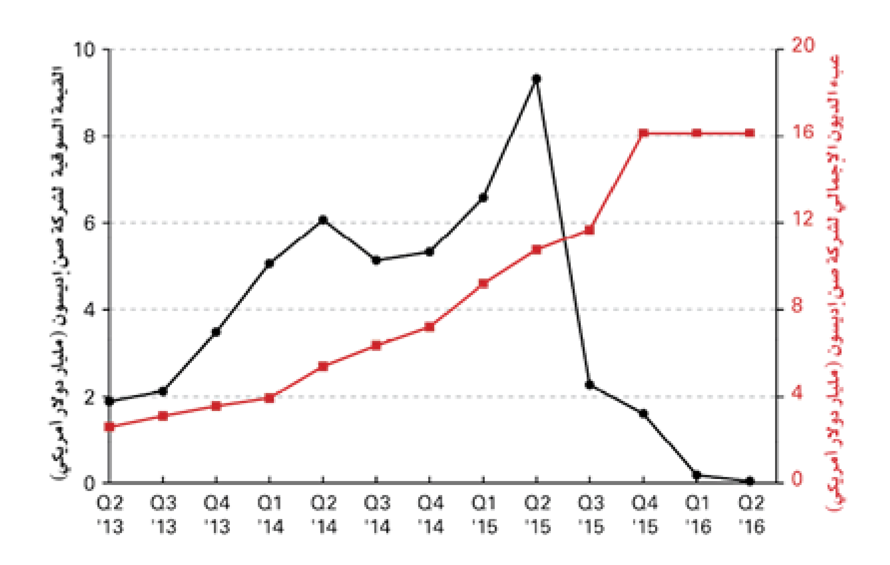
وقال إن مستقبل الصناعة يكمن في تطوير طرق عبقرية لزيادة رأس المال اللازم مسبقًا لبناء مشاريع شمسية جديدة. في الحقيقة أن شركة صن إديسون ابتكرت في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، نموذج أعمال "الطاقة الشمسية كخدمة service-asa-solar"، وحصلت الشركة من خلاله على قروض لبناء منشآت شمسية كبيرة لعملائها من التجار الذين سيدفعون بعد

ذلك مقابل الطاقة المولّدة لعقود قادمة. ولم تتوقف الشركة عند هذا الابتكار بل أخذت تبني إستراتيجيتها للمستقبل على ابتكار مالي جديد: شركة عوائد الأصول الخضراء (YieldCo) (*****) لإعادة تدفقات النقد من أصول الطاقة المتجددة للمساهمين.

كانت فكرة شركة العوائد الخضراء مغرية جدًّا، وتعني بشكل مُبسّط مجموعة من مشاريع الطاقة المتجدّدة التي تمّ تجميعها في شركة مدرجة في سوق الأسهم الأمريكية. ومن خلال بيع الأسهم في سوق الأوراق المالية تستطيع الشركة زيادة رأس المال لشراء مشاريع جديدة للطاقة المتجدّدة، وهو استثمار السيولة النقدية التي يمكن أن يتداوله أيّ مُستثمر تجزئة أو مؤسسة استثمار. وبذلك تكون شركة عوائد الأصول قد عرضت حلًّا مغريًا لزيادة حجم رأس المال المتاح لتمويل الطاقة الشمسية.

أدركت صن إديسون، بالإضافة إلى ذلك، أنّها من خلال إنشاء شركة عوائد خضراء ستجذب العميل الذي سيشتري مشاريع الطاقة الشمسية التي تقوم بتطويرها، ومن ثم تتمّ الاستفادة من الأرباح في بناء المزيد من المشاريع. وإيمانًا منها بهذا النموذج، أنشأت صن إديسون شركتي عوائد أصول خضراء؛ إحداهما تركز على المشاريع في الولايات المتحدة والأخرى لشراء المشاريع في جميع أنحاء العالم النامي. وقد أطلقت حملات إعلانية ضخمة لترويج أسهم هذه الشركات الجديدة بين المستثمرين في سوق الأسهم. وسارع المستثمرون إلى الاستحواذ على هذه الأسهم، متفائلين بوعود صن إديسون بارتفاع أسعارها والأرباح الضخمة. وعلى الرغم من أنّ عددًا قليلًا من محلّلي السوق شكّكوا في ما إذا كان نموذج شركة عوائد الأصول الخضراء سيكون ناجحًا إلى هذا الحدّ، لكن غالبية المحللين تجاهلوا المعارضين؛ فاعتقدت صن إديسون أنّ شركات العوائد الخضراء ستكون قادرة على توفير السيولة النقدية التي تحتاجها من أجل مواصلة نموّها السريع5.

كان النموذج كما اتضح لاحقًا بعيدًا عن الواقع بالفعل؛ فبعد عام واحد فقط من استضافتي لرئيسها التنفيذي المبتهج، سقطت شركة صن إديسون سقوطًا سريعًا من القمّة، معلنة بذلك إفلاسها بعد أن تراكمت عليها الديون التي بلغت 16 مليار دولار (الشكل 4.1). عصفت مجموعة من الأحداث المؤسفة في تلك الفترة؛ كانهيار أسعار النفط العالمية، وقرارات مجلس الاحتياطي الفيدرالي الأمريكي، برفع أسعار الفائدة، ما أفزع المستثمرين ودفعهم إلى التخلّص من حصصهم من أسهم شركة العوائد الخضراء، وتسبّب تراجع أسعار أسهم شركتي العوائد في عدم قدرتها على شراء المشاريع من الشركة الأم (صن إديسون). وواجهت صن إديسون لاحقًا دعاوى قضائية لنهبها الأموال المتبقية من شركات العوائد التي كانت تبدو مستقلّة ظاهريًّا؛ لتسديد ديون الشركة الأم6. بمجرد أن جفّت التدفّقات النقدية من شركات العوائد، لم يكن أمام صن إديسون خيار سوى الانسحاب.



الشكل (4.1): انهارت القيمة السوقية لشركة صن إديسون بسبب الديون المتراكمة. يقيس المحور الأيسر القيمة السوقية لشركة صن إديسون (الدوائر المملوءة) التي بلغت ذروتها عند قرابة 10 مليارات دولار في عام 2015م قبل أن تعلن الشركة إفلاسها في أبريل 2016م. ويقيس المحور الأيمن عبء ديون الشركة (المربعات المملوءة) الذي ارتفع إلى أكثر من 16 مليار دولار حيث استحوذت صن إديسون على الشركات، ووسّعت خط أنابيب مشاريعها حول العالم.

المصدر: بلومبرج.

في أعقاب انهيار شركة صن إديسون، سارع المحلّلون لتحديد مكامن الخطأ الذي حدث؛ هل كانت هذه نهاية الهندسة المالية للطاقة الشمسية؟ هل كان من غير الواقعي توقّع أن يصعد عملاق في مجال الطاقة الشمسية لتحدّي عمالقة الوقود الأحفوري؟ الجواب الصحيح لكلا السؤالين هو: (لا). لقد أخفقت شركة صن إديسون بسبب إستراتيجية النمو عالية المخاطر، وبسبب حوكمة شركات العوائد الخضراء المثيرة للجدل، وأيضًا نتيجة لسرعة تراكم الديون.

لكن شاتيلا لم يكن مخطئًا في قناعاته بأنّ الابتكار المالي يستطيع تمكين صناعة الطاقة الشمسية من توسيع نطاق نشر تقنية الألواح الشمسية الحالية بسرعة. لقد كانت أخطاء صن إديسون هي أخطاؤها، لكنها لا تتعارض مع الرؤية الأوسع لإيجاد طرق لتمكين المستثمرين الجدد من تمويل مشاريع الطاقة الشمسية التي تتوافق بشكل جيد مع معايير الاستثمار الخاصّة بهم. وعلى الرغم من أنّ فشلها يمثّل انتكاسة للصناعة، إلا إنّ صن إديسون لن تكون آخر شركة صاعدة للطاقة الشمسية لديها القدرة على منافسة شركات النفط الكبرى.

في الواقع، على الرغم من أنّ قطاع الطاقة الشمسية سريع النمو يحتاج إلى تمويل أكثر مما يمكن أن يقدّمه مستثمروه الحاليون، إلا أنّه يوجد سبب يدعو للتفاؤل بأنّ ابتكار النماذج المالية والتجارية سيوفّر تريليونات الدولارات من الاستثمارات الجديدة في السنوات القادمة. وتُعدّ المشاريع القائمة على تقنية الطاقة الشمسية الحالية بوجه عام استثمارات آمنة بشكل ملحوظ. وتُعدّ أيضًا منشآت

الطاقة الشمسية الكهروضوئية الحالية مشاريع بنية تحتية بسيطة، تنتج الطاقة لعقود بمجرّد إنشائها، فضلًا عن أنّ تكاليف الطاقة الشمسية تنخفض بشكل متوقع، ما يجعل دراسة الجدوى أكثر جاذبية. وبالنظر إلى هذه المميّزات فإنّ الطاقة الشمسية تتطابق جيدًا مع حاجات المستثمرين المؤسّسيين الأثرياء في جميع أنحاء العالم، وهذا كلّه يشير إلى أنّها مسألة وقت فقط قبل أن تجمع الأساليب الجديدة حجمًا كبيرًا من رأس المال لتمويل الطاقة الشمسية.

لا يتطلّب الابتكار المالي لتكوين رأس مال ضخم إعادة اختراع العجلة؛ فوفقًا لنموذج شومبيتر الفكري (أنظر الإطار 3.1 في الفصل 3)، يُعدّ الابتكار اختراعًا طُرِح في السوق؛ لذا فإنّ تكييف الأدوات المالية الجديدة من القطاعات الأخرى وتعميمها لأول مرة في قطاع الطاقة الشمسية يجسّد الابتكار المالي. ووفقًا "لقيصر الطاقة" في نيويورك ريتشارد كوفمان Richard Kauffman، يوجد كثير من النماذج الملهمة التي يمكن استخلاصها من قطاعات الاقتصاد الأخرى لزيادة مصادر تمويل مشاريع الطاقة الشمسية:

"تعتمد المشاريع في [الولايات المتحدة] على نموذج تمويل قديم الطراز عفا عليه الزمن، يختلف عن كيفية تمويل أجزاء أخرى من الاقتصاد الأمريكي. وبدلًا من استخدام أسواق السندات أو الأسهم، تعتمد المشاريع على مصادر غير رأس مالية تسمّى الأسهم الضريبية، وديون البنوك، والأسهم الخاصّة؛ حيث يمكن أن تقارب عوائد هذه النماذج معدلات عوائد الأسهم الخاصّة النموذجية بنسبة (12-15) بالمئة. [الإستراتيجيات الجديدة]... لا تتطلّب الذهاب إلى المختبر؛ إنها تنطوي على تطبيق تقنيات التمويل التي اختُرِعت بالفعل، وتستخدم على نطاق واسع في أجزاء أخرى من الاقتصاد، ولكن لم يتم تبنيها بعد في هذا القطاع"[7].

يقترح كوفمان أنّ صناعة الطاقة الشمسية يمكن أن تموّل المشاريع بتكلفة رأس مال أقلّ من خلال الاستفادة من أسواق رأس المال العامة، وهو معدّل العائد الذي يطلبه المستثمرون الذين يوفّرون رأس المال، ما يمكّنها من استخدام الأموال من مصادرها الخاصّة الحالية.

تحتاج الصناعة لنشر مشاريع الطاقة الشمسية إلى توظيف نوعين من رأس المال: رأس مال حقوق الملكية (equity capital) ورأس مال المدين (debt capital)؛ حيث يوفّر المستثمرون رأس مال حقوق الملكية للشركة مقابل حصّة ملكية، ويقدّمون رأس مال مدين مقابل وعد بأن يُسدَّد في تاريخ لاحق مع الفائدة. يمكن زيادة رأس المال البسيط في أسواق الأسهم العامة، التي يشتري المستثمرون من خلالها حصصًا في الشركات المدرجة، ويكسبون عوائد من خلال الزيادات في أسعار الأسهم أو توزيعات الأرباح. وبالإضافة لحقوق الملكيّة، تحتاج الصناعة إلى رأس مال مدين الذي يميل إلى أن يكون أرخص من رأس مال حقوق الملكية. وعليه، فهو يمثّل غالبية تمويل البنية التحتية، حيث يمكن جمع رأس مال للديون في أسواق السندات العامة بأقلّ التكاليف، بحيث يقدّم المستثمرون من خلالها قروضًا لفترة محدّدة مسبقًا، ويتلقّون مدفوعات الفائدة في هذه الأثناء. سيؤدّي الوصول إلى هذين

السوقين العاميّن لرأس المال إلى ربط صناعة الطاقة الشمسية بمجموعة واسعة من المستثمرين، بما في ذلك المستثمرون المؤسسيون الأثرياء والمتعطشون لتمويل البنية التحتية.

للاستفادة من أسواق الأسهم العامة، يمكن للصناعة أن تحاكي الإستراتيجيات التي تطبقها صناعة النفط والغاز لزيادة رأس المال العام لمشاريع البنية التحتية، مثل خطوط الأنابيب العابرة للقارات، فقد صُمِّمت شركة عوائد الأصول الخضراء في الأصل على غرار نموذج مالي مشترك بين صناعة النفط والغاز. ومن الواضح أنّ هذا التقليد لم يكن ناجحًا تمامًا، لكنّ الصناعة تعمل بالفعل على تعديلات لجذب رأس المال لمشاريع الطاقة الشمسية من دون التعرّض لخطر انفجار داخلي آخر مثل ما حدث لشركة صن إديسون. وللوصول إلى أسواق السندات العامة، وخاصة لتمويل مشاريع الطاقة الشمسية الصغيرة الموزّعة من خلال رأس مال المدين، يمكن للصناعة أن تستخدم الإستراتيجية التي تستخدمها صناعات العقارات والسيّارات لجعل امتلاك منزل أو قيادة سيارة في متناول ملايين الأمريكيين: تعرض مثل هذه الإستراتيجيات مجموعة متنوّعة من محافظ القروض الاستهلاكية في الأوراق المالية التي يمكن أن تجذب تداول المستثمرين. من المفارقات أنّ هذه الاستراتيجية المعروفة باسم "التوريق المالي securitization "، كانت سبب الركود العظيم في عام 2009م. ولكن يمكن لصناعة الطاقة الاستفادة من التوريق بأمان وربح من خلال جمع البيانات من مشاريع الطاقة الشمسية وتحليلها بدقّة؛ لضمان أنّ المستثمرين يمكنهم تقييم مخاطر عدم الحصول على عائد.

لكنّ تسريع نشر مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية سيتطلّب أكثر من تواجد المستثمرين الأثرياء؛ حيث تستفيد صناعة النفط والغاز من الشركات العملاقة التي تستخدم ميزانياتها العامة الضخمة في تحديد المشاريع الجديدة وتطويرها. وبالمثل، سيتعيّن أيضًا على الشركات الكبيرة أن تتحمل المخاطر الأولية لتطوير منشآت الطاقة الشمسية وأن تعمل بوصفها قناة لتوجيه رأس المال من المستثمرين الأثرياء إلى المشاريع الجديرة بالاهتمام. صحيح أن لدى قطاع الطاقة مثل هؤلاء العمالقة، ولكنّ قليلين منهم على استعداد لاحتضان الطاقة الشمسية.

وغالبًا ما تركز المرافق الكهربائية المنظّمة في الولايات المتحدة، التي تمتلك الشبكة وتُشغّلها، وتخضع لرقابة حكومية صارمة، على التهديد المحتمل من انتشار الطاقة الشمسية. بالمقابل، تسعى شركات الطاقة غير الخاضعة للتنظيم في الولايات المتحدة وخارجها بقوّة لفرص الاستثمار في الطاقة الشمسية، ومعظمها في مشاريع على نطاق المرافق. وقد بدأت حتى الشركات خارج قطاع الطاقة، بما في ذلك عمالقة التقنية مثل جوجل ومايكروسوفت، في الاستثمار في الطاقة الشمسية بشكل كبير.

يجب أن يكون القطاع الخاص حاضرًا بقوة في تمويل الطاقة الشمسية، إضافة إلى القطاع العام الذي يؤدّي أيضًا دورًا مهمًّا. فإذا استخدمت الحكومات مواردها بذكاء، وهي شحيحة مقارنة برأس مال

الطاقة الشمسية، فيمكنها حشد المزيد من السيولة النقدية من القطاع الخاص. وقد كشفت حكومات الولايات والحكومات المحلية الأمريكية بالفعل عن مجموعة متنوّعة من الأساليب المبتكرة لتشجيع تدفقات الاستثمار الخاص. على سبيل المثال، من خلال حشد قوّة الاقتراض العامة لتوجيه رأس المال نحو الطاقة الشمسية. وتعمل الحكومات الوطنية في جميع أنحاء العالم أيضًا على طرح مبادرات لجذب رأس المال؛ مثل مساعدة المستثمرين الأجانب في حمايتهم من مخاطر انخفاض قيمة العملة المحلية. وتقوم المؤسسات من مختلف الجنسيات، بما في ذلك البنك الدولي، بنشر آليات لتعزيز الائتمان، ما يجعل شروط الاستثمار في الطاقة الشمسية أكثر جاذبية. أما الأهم من ذلك، فهو أنّ على الحكومات تجنّب الحوافز العشوائية التي تجعل الطاقة الشمسية معتمدة على الأموال العامة؛ لأن الهندسة المالية والحوافز العامة لن تنجح في إطلاق تدفّقات كبيرة من رأس المال الخاص إلا إذا كانت مشاريع الطاقة الشمسية قادرة على الربح.

لهذا، يعدّ انتشار الأساليب المبتكرة لتوجيه رأس المال نحو الطاقة الشمسية بداية واعدة، وربما يظهر من رماد اللهب رائدًا حقيقيًّا في مجال الطاقة الشمسية مثل شركة صن إديسون.

نحو شركة عوائد خضراء من الجيل الثاني

كان النموذج المالي الآتي من صناعة النفط والغاز الذي ألهم شركات عوائد الأصول للطاقة المتجدّدة أداة مالية قديمة تُعرف باسم الشراكة المحدودة الرئيسة (Master Limited Partnership- MLP) التي تجمع محفظة متنوّعة من أصول البنية التحتية للنفط والغاز، مثل خطوط الأنابيب ومرافق المعالجة. ويستطيع المستثمرون بعد ذلك شراء أسهم الشراكات المحدودة في سوق الأوراق المالية؛ حيث تحظى هذه الشراكات بمعاملة خاصة بموجب قانون الضرائب الأمريكي: فهي لا تدفع أيّ ضرائب على الشركات، ويمكنها توزيع الإيرادات الناتجة من أصول النفط والغاز مباشرة على المساهمين بوصفها أرباحًا. يضاف إلى ذلك الشعبية الكبيرة التي تحظى بها هذه الشراكات لأنها تتمتع بالسيولة (مثلًا، يستطيع المستثمرون تداول أسهمهم بسهولة في سوق الأسهم)، ويقومون بتنويع المخاطر من خلال تجميع العديد من الأصول. ويستطيع المساهمون توقّع أرباح ثابتة، فقد بلغت قيمة الشراكات المحدودة المدرجة في البورصة في عام 2016م، ما يقرب من نصف تريليون دولار.

إذا كان من الممكن تجميع مشاريع الطاقة الشمسية معًا في الشراكات المحدودة وإدراجها في أسواق الأسهم العامة، فستكون الصناعة قادرة على الاستفادة من تجمّعات غير محدودة من رأس مال حقوق الملكية، تمامًا كما فعلت صناعة النفط والغاز. والسبب في ذلك هو أن أكبر المستثمرين في العالم متعطّشون لفرص جديدة للاستثمار في البنية التحتية؛ فقد تضاعف عدد المستثمرين المؤسّساتيين الذين يمتلكون أصول البنية التحتية إلى أكثر من الضعف من عام 2013م إلى عام

2017م.9 ويبحث المستثمرون الأكثر نشاطًا؛ مثل صناديق الأسهم الخاصّة، عن استثمارات مستقرّة في البنية التحتية (شهد العالم شراكة بقيمة 40 مليار دولار في عام 2017م بين صندوق الاستثمارات العامة السعودي، وشركة بلاكستون Blackstone الأمريكية، وهي مستثمر في الأسهم الخاصّة، وهي مهيكلة لحيازة البنية التحتية طويلة الأجل)10.

يبحث مستثمرو البنية التحتية عن فرص لجمع رؤوس أموالهم وجني أرباح ثابته لسنوات عدّة أو حتى عقود من دون القلق بشأن إعادة استثمار أموالهم في أصول جديدة، وتعدّ مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية مناسبة لهذا النوع من الاستثمارات، إلّا أنّه لا يمكن تجميعها في شراكات محدودة؛ بسبب قيود قانون الضرائب الأمريكية التي سُنَّت منذ ثلاثين عامًا قبل التنبّؤ بأنه سيكون لدى المستثمرين يومًا ما رغبة كبيرة لإدراج مشاريع الطاقة الشمسية في محافظهم الاستثمارية. وبعد أن شكّلت شركات النفط والغاز أول شراكة محدودة في الثمانينيات من القرن الماضي، شاعت هذه الممارسة في قطاعات أخرى، وحتى الفِرَق الرياضية؛ وذلك بسبب المزايا الضريبية. إلّا أنّ الكونجرس ضيّق في عام 1987م نطاق استخدام نموذج الشراكة المحدودة الرئيسة على أنشطة معينة؛ سعيًا لمنع التهرّب الضريبي، وتشجيعًا في الوقت ذاته لبعض أشكال الاستثمار كصناعة ونقل الموارد الطبيعية القابلة للنضوب. وقد حاول المشرعون دون جدوى تعديل قانون الضرائب الأمريكي في الآونة الأخيرة مع تزايد أهمّية الطاقة المتجدّدة، حيث قدّم السيناتور كريس كونز وجيري موران في عام 2012م مشروع قانون من قبل الحزبين، وهو قانون تكافؤ الشراكة المحدودة الرئيسة the MLP Parity Act؛ للسماح للشراكات المحدودة بتضمين أصول الطاقة المتجدّدة، لكن التشريع قوبل بالرفض.

لكن كل هذا لم يُثنِ بعض شركات الطاقة التي ابتكرت هيكلية لشركة عوائد كطريقة لمحاكاة الشراكة المحدودة الرئيسة؛ حيث أدرجت شركة الطاقة الأمريكية (Natural Resources Group-NRG شركة المصادر الطبيعية) في عام 2013م كأول شركة عامة للعوائد الخضراء، وسُمّيت آنذاك إن. أر. جي. ييلد (NRG Yield)، ما أدى إلى إطلاق موجة من خمسة عشر اكتتابًا في شركات العوائد الأمريكية والأوروبية على مدار العامين التاليين، اتّبعت جميعها النموذج الأولي للشراكات المحدودة، من خلال تجميع مجموعة متنوّعة من مشاريع الطاقة المتجدّدة، وإدراجها في سوق الأوراق المالية، ودفع أرباح ربع سنوية للمساهمين. تمتلك معظم شركات العوائد مجموعة كبيرة من مشاريع الطاقة الشمسية للمرافق العامة وطاقة الرياح، على الرغم من أن بعضها غامر بامتلاك منشآت شمسية أصغر على الأسطح أيضًا.

سرعان ما بدأت شركات العوائد الخضراء الأوروبية والأمريكية بالتباين في نهجها؛ إذ كانت شركة العوائد الأوروبية شركات قابضة بشكل أساسي، ولم تقدّم للمستثمرين أكثر من طريقة ملائمة للاستثمار في مجموعة من مشاريع الطاقة المتجدّدة. أما الشركات الأمريكية فكانت لديها خطط طموحة لشركة العوائد الخضراء التي أنشأتها؛ فبعض هذه الشركات، مثل إن. أر. جي. (NRG)

ونكستيرا (Nextera)، تمتلك محطّات طاقة تقليدية. وتُعدّ مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وسيلة جذابة لتنويع أصولها. كانت شركات أخرى مثل صن أديسون، وصن باور، وفيرست سولار، من الشركات التي رغبت في الاستفادة من حصّتها في سوق الطاقة الشمسية المتنامية؛ فقد رأى كلا النوعين من الشركات أنّ عوائدهما ليست وسيلة لجلب المزيد من رأس المال إلى صناعة الطاقة الشمسية فحسب، ولكن أيضًا بوصفها وسيلة لتحقيق نموّ لشركاتها أيضًا.

أدّت هذه الدافعية إلى شراكة ذكية بين الشركات الأم الراعية (مثل إن أر جي، وصن أديسون) وشركات العوائد الخضراء الصغيرة. وفيما يأتي آلية عمل هذه الشراكة: ينشئ الراعي شركة عوائد خضراء وتُدرَج في سوق الأسهم العامة، ويُعلَن عنها بوصفها شركة مستقلة مع الاحتفاظ بدرجة معيّنة من السيطرة على عمليّاتها؛ مثل امتلاك أكبر حصّة من ملكية الشركة أو بأغلب مقاعد مجلس الإدارة. ثم يُقسّم الراعي وشركة العوائد الخضراء الأنشطة على أساس نسبة المخاطر (منخفضة وعالية) لتطوير مشروع ما للطاقة المتجدّدة. ويتولى الراعي الأنشطة عالية المخاطر، مثل الحصول على قطع الأراضي والتصاريح الحكومية، وبناء مزرعة للطاقة الشمسية، وإيجاد مشترٍ طويل الأجل للطاقة. بالمقابل، تقوم شركة العوائد الخضراء بالأنشطة الأقل خطورة لامتلاك مجموعة متنوّعة من المشاريع وتشغيلها.

هذا الفصل بين الأنشطة عالية المخاطر ومنخفضة المخاطر سيسمح لكلّ من الراعي وشركة العوائد بكسب المال عندما تشتري الثانية مشروعًا من الشركة الأم، ويبيع الراعي المشاريع التي تم تشييدها بالتسعير المتميز بما يكفي لتوزيع الأرباح للمستثمرين مقابل المخاطر التي تحملوها. لكنّ شركة العوائد الخضراء ترى أنّ هذا السعر معقول؛ لأنّ مساهميها لن يطالبوا بعائدات ضخمة على استثمار منخفض المخاطر. وفي الحقيقة أن المساهمين رأوا أنّ توزيعات الأرباح الموثوقة، التي تحقّقت من أرباح بيع الطاقة الشمسية التي تنتجها المشاريع المملوكة لشركات العوائد، بديلًا رائعًا للعائدات الهزيلة التي يمكن تحصيلها من السندات الحكومية الأمريكية والاستثمارات الآمنة الأخرى13.

يبدو الأمر حتى الآن جيدًا، لكنّ ما حدث هو أنّ الرعاة بالغوا في بيع حصص شركة العوائد للمستثمرين، وهو تكتيك أدّى في النهاية إلى تدمير النموذج؛ فلم يذهب أيّ راعٍ إلى أبعد ممّا وصلت إليه صن أديسون التي باعت وهم أنّ شركة العوائد ستُغدق الأموال على مستثمريها. ونتيجة لهذا الوعد الخيالي، لم يتوقع المساهمون أرباحًا أكيدة من أول شركة عوائد فحسب، بل تطلعوا إلى زيادة النمو في هذه الأرباح - بما يزيد على 30٪ سنويًّا14.

لكن، كيف يمكن تحقيق هذه المكاسب، إذا أخذنا بالحسبان أنّ الأرباح كان ينبغي أن تعكس فقط تدفّقات الإيرادات المستقرّة لمشاريع الطاقة الشمسية الأساسية؟ ومع ذلك أستمرت صن أديسون في إعطاء الوعود، وكان ذلك ممكنًا لأنّ شركات العوائد الخضراء كانت ستستمرّ في شراء مشاريع

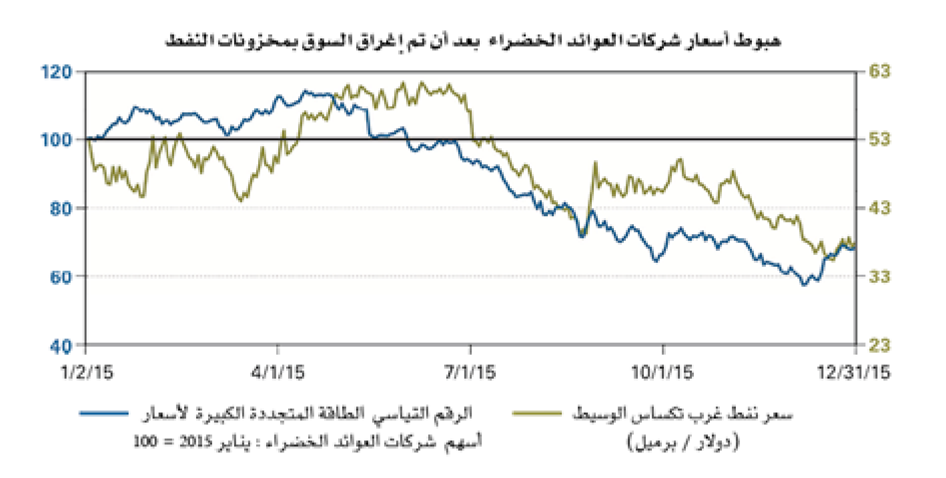
جديدة، التي من شأنها أن تولد إيرادات جديدة. طمأنت صن أديسون المستثمرين بأن هذه المشاريع الجديدة ستكون "تراكمية"؛ أي إنّها ستزيد من قيمة شركات العوائد، وتعزّز أسعار الأسهم، وتمكّنها من الاستحواذ على المزيد من الأسهم المنخفضة في الأسواق العامة من أجل شراء المزيد من المشاريع. كان النموذج دوامة محمومة متصاعدة- حلقة من أعمال الخير التي تضمن أنّ كلّ شخص سيجني الأرباح15.

استغلّ المستثمرون كلّ شيء، وكان معظمهم من المستثمرين الرئيسيين في الشراكات المحدودة الرئيسة للنفط والغاز، وقد سال لعابهم لاكتشاف وسيلة استثمارية مألوفة مع احتمالات نمو مدهشة. بحلول صيف عام 2015م، زايدوا على القيمة السوقية لشركة العوائد الخضراء ورفعوها إلى 28 مليار دولار؛ أي أكثر من ضعف ما كانت عليه عند إدراجها لأول مرة في السوق.16 لكن النشوة لم تدم طويلًا، فمثلما ارتفعت قيمة شركة العوائد الخضراء إلى الأعلى، كانت معرّضة لخطر هبوط مدمّر؛ فإذا انخفضت أسعار أسهمها، فإنّ العوائد على الأرباح الموزعة سترتفع بالضرورة، ولا يعود بإمكان شركة العوائد شراء مشاريع الطاقة الشمسية باهظة الثمن من المطوّر الرئيس وهي لا تزال تدفع الأرباح المتوقّعة لمساهميها. إن من شأن هذا الركود أن يؤدّي إلى المزيد من انخفاض أسعار الأسهم واستمرار دوّامة الهبوط.

تحوّل الصعود إلى الهبوط بمحض الصدفة في يوليو 2015م. في ذلك العام حدثت مجموعة من الأحداث العشوائية التي ما كان لها، بحد ذاتها، أن تؤثر كثيرًا في صناعة الطاقة الشمسية، إلّا أنّها كانت مع ذلك الشعرة التي قصمت ظهر البعير. لقد انهارت أسعار النفط بنسبة 20 بالمئة، الأمر الذي أثار مخاوف المستثمرين في الشراكات المحدودة الرئيسة الذين تكدّسوا في شركة العوائد الخضراء؛ فشعروا بالذعر الشديد، ما تسبّب في بيعهم كلًّا من الشراكات المحدودة الرئيسة وشركة العوائد الخضراء. ربما لم يكن هذا البيع عقلانيًّا تمامًا؛ لأنّ مشاريع الطاقة الشمسية تنتج الكهرباء في نهاية الأمر، وأما النفط فيزوّد المركبات بالوقود. ولا يتنافس الاثنان في كثير من الأحيان، ولا يتنافسان إطلاقًا في الولايات المتحدة (على الرغم من أنّ بعض البلدان، مثل المملكة العربية السعودية، تستخدم النفط في توليد الطاقة).

كما أصيب المستثمرون بالفزع من تصريحات صانعي السياسات الفيدراليين في الولايات المتحدة الذين أكّدوا ارتفاعًا وشيكًا في أسعار الفائدة، ما يعني أنّ شركة العوائد الخضراء ستواجه منافسة من السندات الحكومية والاستثمارات الآمنة الأخرى، التي ستكون عوائدها أكثر جاذبية. وبالإضافة إلى ذلك كلّه، أصدرت أربع شركات للعوائد الخضراء أسهمًا بقيمة ملياري دولار في يونيو ويوليو، فقمن بضخّ معروض جديد من أسهم شركة العوائد الخضراء في السوق في الوقت الذي عزف عنها المستثمرون المتردّدون؛ ولذلك انخفضت أسعار أسهم شركة العوائد الخضراء (الشكل 4.2). ونتيجة لذلك، خسرت شركات العوائد الخضراء التابعة لشركة صن إديسون ما يزيد على 80٪ من قيمتها السوقية خلال الأشهر الستة، ما أدّى إلى زوالها بعد ذلك بوقت قصير، عندما لم تعد قادرة

على مجابهة الديون المتراكمة نتيجة بناء مشاريع الطاقة الشمسية التي لم تعد شركة العوائد الخضراء قادرة على تحمّل شرائها17.



الشكل (4.2): انهيار أسعار النفط لعام 2015م وقيمة شركة العوائد الخضراء في السوق الأمريكية. يقيس المحور الأيسر المتوسّط المرجّح لأسعار أسهم شركة العوائد الخضراء في سوق الأوراق المالية التي زادت بنسبة 15٪ في النصف الأول من عام 2015م، قبل التخلّص من نصف قيمتها في وقت لاحق من ذلك العام. ويقيس المحور الأيمن سعر النفط في الولايات المتحدة، الذي ارتفع فوق 60 دولارًا للبرميل في أبريل 2015م قبل أن ينخفض إلى أقلّ من 40 دولارًا للبرميل.
المصدر: Sivaram, 2016.

من المفارقات أنّ مشاريع الطاقة الشمسية ظلّت خلال هذه الفترة من الاضطرابات استثمارًا جاذبًا بشكل أساسي؛ لأنّ انخفاض أسهمها جعلها أكثر قدرة على المنافسة من الناحية الاقتصادية. ولكنّ ما قامت به شركات العوائد الخضراء الأمريكية من خلال السعي لنمو سريع، يُعدّ دليلًا على أنّ مشاريع الطاقة الشمسية لا تملك حصانة أمام سوق الأوراق المالية المتقلبة، أو كونها ملاذًا استثماريًّا عالي الأمان. أما من خلال الاعتماد على النمو التصاعدي، فقد ثبّت رعاة شركة العوائد الخضراء أسعار الأسهم المتزايدة في نموذج أعمال شركة العوائد الخضراء؛ فجعلوا بذلك نجاح شركة العوائد الخضراء أكثر اعتمادًا على ما إذا كان باقي السوق يرتفع أم ينخفض. وقد أضافت هذه المخاطر الإضافية، بحسب أحد التقديرات، نقطتين مئويتين باهظتين إلى تكلفة حقوق ملكية شركة العوائد الخضراء، ما جعل من الصعب عليها جمع رأس مال بتكلفة منخفضة18.

تمكن الرعاة أيضًا من تحويل قوّة أخرى محتملة في شركة العوائد الخضراء إلى نقطة ضعف من خلال ممارسة سيطرتهم على قرارات أعمالها. من الناحية النظرية، يجب أن تكون شركات العوائد الخضراء وسائل منخفضة المخاطر تمتلك المشروعات وتديرها بمعزل عن المخاطر العالية التي يتحملها مطوّرو المشروع. لكنّ بعض الرعاة، مثل صن إديسون، أجبروا شركات العوائد الخضراء الخاصّة بهم على ضمان شراء المشاريع قبل اكتمالها، فتحملت مخاطر الإنشاء المرتبطة بها.

يضاف إلى ذلك أنّ صن إديسون حاولت الاستحواذ على الودائع النقدية لشركة العوائد الخضراء العالمية عندما أصبحت الظروف صعبة عليها. وعندما احتجت إدارة الشركة على ذلك، حلّت صن إديسون مجلس إدارة شركة العوائد الخضراء، ووافق مجلس الإدارة الجديد بطريقة سحرية على الفور على تحويل 150 مليون دولار إلى صن إديسون19. لكن من خلال ربط شركات العوائد الخضراء بثرواتها المتقلبة، زادت صن إديسون من مخاطر ما كان ينبغي أن تكون شركة قابضة مستقرة ومستقلة.

منذ انفجار الفقاعة، صارت أسعار أسهم شركات العوائد الخضراء الأمريكية التي نجت بعوائدها، أكثر قابلية للمقارنة مع نظيراتها في أوروبا، التي حافظت بشكل مطّرد على تقييمات متواضعة. لقد اتّبعت شركات العوائد الخضراء في المملكة المتحدة على وجه الخصوص نموذجًا أقلّ طموحًا، يمكن أن يكون بمثابة وسيلة أكثر استقرارًا من السهل تطبيقها في جميع أنحاء العالم. يضاف إلى ذلك أنّ شركات العوائد في المملكة المتحدة تميل إلى عدم الانتماء إلى جهة راعية معينة، ما يؤدّي إلى حمايتها من التدخّل الخارجي، وهي مصمّمة لتنمو بشكل متواضع للغاية، بما يتماشى مع التضخم، بدلًا من التهام مشاريع جديدة لتغذية أسعار الأسهم وزيادة الأرباح. وأخيرًا، فإنها تعتمد بدرجة أقلّ على الديون من نظيراتها الأمريكية، ما يقلّل المخاطر إلى حد كبير.

ليس كلّ شيء مثاليًّا بخصوص هذه النوع من المساهمات؛ إذ تميل شركات العوائد في المملكة المتحدة على وجه الخصوص إلى تنوّع محدود في المشاريع التي تمتلكها. ومع ذلك فإنّ الخطوط العامة واعدة بالنسبة إلى شركة العوائد البريطانية YieldCo.K.U - وهي شركة قابضة متواضعة توفر فرص سيولة استثمارية في أصول طاقة متجدّدة آمنة. ولا يقتصر النموذج على العالم المتقدّم فقط؛ فالشركات في الهند، مثلاً، تتطلع إلى إدراج صناديق الاستثمار علنًا في البنية التحتية التي يمكن أن تضمّ مشاريع الطاقة الشمسية، من بين أصول أخرى. وبعد أن تعلّموا من حادث انهيار شركة العوائد الأمريكية YieldCo .S.U، يفرض المشرّعون في الهند قوانين من شأنها أن تمنع راعيًا واحدًا من ممارسة الكثير من السيطرة على هذه الشركات20.

اقترح بعض المحللين اتخاذ خطوة إضافية لإطلاق نسخة جديدة من الجيل الثاني لشركة عوائد خضراء أكثر حداثة من شأنها أن تحلّ مشكلات الإصدار الأمريكي الأولي جميعها. وأطلقت مبادرة سياسة المناخ The Climate Policy Initiative على هذه الأداة المالية اسم "صندوق استثمار الطاقة النظيفة Clean Energy Investment

Trust". قد يشبه هذا الصندوق شركة العوائد الخضراء الأوربية إلى حدّ كبير، لكنّها تستهدف الاستثمار في مجموعة أوسع بكثير من مشاريع الطاقة المتجدّدة (ربما عبر الحدود الدولية ومن عدّة مطوّرين مختلفين) لبناء محفظة متنوّعة من دون الاعتماد على راعٍ واحد. وتستطيع شركات الاستثمار صياغة هذه الأداة وتشكيلها من المراحل الأولى؛ وذلك لضمان حصولها على رسوم

إدارية منخفضة، وتوزيع جميع الإيرادات من المشاريع الأساسية على المستثمرين، ومنع إضافة مشاريع جديدة أو مطاردة النمو. 21

ربما تكون الشركات العامة المتداولة (قد يصبح مصطلح "شركة العوائد الخضراء" قديمًا، لكن المفهوم الأساسي يجب أن يستمر) قادرة في المستقبل على جمع رأس مال الأسهم الرخيصة لمجموعة متنوّعة من الأصول الشمسية، وليس فقط مزارع الطاقة الشمسية على نطاق المرافق، على الرغم من أن الجيل الأول من هذه الشركات ركز إلى حد كبير على زيادة رأس مال الأسهم للمشاريع الكبيرة. إن استراتيجية تجميع الأصول في شركة قابضة التي تمكّن المستثمرين في أسواق الأسهم من شراء حصص الملكية يمكن أيضًا تطبيقها مع الأصول الصغيرة، مثل الأسطح الشمسية. وإذا تنامت شركات العوائد الخضراء، فيمكن تخصيصها بحيث تلبّي كلّ واحدة منها حاجات سوق متخصص مختلف22.

الجانب المشرق من إخفاق النسخة الأولى من شركة العوائد الخضراء هو أنّ صناعة الطاقة الشمسية استفادت من التجربة، وهي الآن تتجه نحو الأدوات المالية التي يمكن أن تجتذب مستثمرين جددًا من دون إضافة مخاطر غير مرغوب فيها للقطاع. وبالعودة إلى الولايات المتحدة، فبالإضافة إلى إعادة تصميم نموذج شركة العوائد الخضراء، تضاعف شركات الطاقة الشمسية جهودها لإقناع الكونجرس بتعديل قانون الضرائب؛ لجعل مشاريع الطاقة المتجدّدة تندرج ضمن الشراكات المحدودة الرئيسة. كما تضغط على المشرعين لجعل إدراج مشاريع الطاقة المتجدّدة في صناديق الاستثمار العقاري قانونيًّا. وستُمكّن كلتا الحركتين من استخدام أدوات مالية موثوقة وحقيقية لتوجيه رأس المال نحو الطاقة الشمسية23.

بعد دورة صاخبة من الازدهار والكساد، بدأت صناعة الطاقة الشمسية في النضوج. وفي الوقت الذي تفكر فيه في مراجعة إستراتيجيتها للاستفادة من الأسواق العامة لرأس مال حقوق الملكية، يبدو الآن أنها تسير على الطريق الصحيح لتحقيق التوازن بين الابتكار المالي والإقبال على المخاطرة الأقل، وهذا أمر واعد. ولكن، ماذا عن رأس مال المقترض؟ وجدت شركة صن إديسون نفسها تحت ركام من الديون المتزايدة. فهل تستطيع صناعة الطاقة الشمسية الأوسع نطاقًا تجنّب مخاطر الرافعة المالية الكبيرة مع الاستمرار في استخدام الهندسة المالية لتوسيع مجموعة رأس المال المتاحة؟

ملاءة التوريق

للوهلة الأولى، قد يكون من المقلق أنّ تكون الحيلة المالية التي تستخدمها بعض شركات الطاقة الشمسية لجذب رأس المال المقترض بشكل أرخص هي المناورة ذاتها التي ساعدت في التسبّب في الركود الاقتصادي الكبير؛ حيث استخدمت البنوك الاستثمارية حيلة التوريق لتجميع قروض الرهن العقاري عالية المخاطر من جميع أنحاء البلاد وتقسيمها إلى شرائح. لقد تمكّنت هذه الشركات من

خداع وكالات التصنيف لإثبات أنّ المشتقّات، التي تُصنّف في الواقع بأنّها عالية المخاطر، منخفضة المخاطر. ولأنه لا ينتج من أي هندسة مالية تتعامل مع مدخلات سيئة سوى مخرجات سيئة، فعندما انكشف هذا الواقع، انهار الاقتصاد العالمي.

ولكن هناك سبب وجيه للتفاؤل بأنّ التوريق لن ينتهي بكارثة عندما يتعلق الأمر بتمويل منشآت الطاقة الشمسية الموزّعة على أسطح المنازل والشركات. من حيث الجوهر، لا يوجد خطأ في التوريق، وهو مصطلح عام يشير فقط إلى تجميع العديد من الأصول معًا لإنشاء أوراق مالية يمكن للمستثمرين شراؤها وتداولها بعد ذلك. وفي الحقيقة إنّ عملية تجميع مجموعة متنوّعة من القروض تعدّ طريقة مجرّبة وحقيقية للحدّ من المخاطر. ومن خلال التدقيق بعناية في كلّ من القروض الأساسية، يستطيع المرء أن يكون واثقًا من أنها لن تتعثّر كلّها مرة واحدة.

منذ بداية السبعينيات من القرن الماضي، شرعت البنوك في توريق قروض الرهن العقاري، وتجميعها معًا لإنشاء أوراق مالية مدعومة بالرهن العقاري يستطيع المستثمرون شراءها بعد ذلك. وقد أدّت هذه الأوراق المالية في العقود اللاحقة إلى ظهور فئة أكثر عمومية من الأوراق المالية المدعومة بالأصول، توفّر للمستثمرين فرصة للاستثمار في كلّ شيء؛ بدءًا من قروض السيارات وقروض الطلاب حتى حقوق امتياز الدومينوز بيتزا.

في الفترة التي سبقت الأزمة المالية، أساءت وول ستريت استخدام التوريق من خلال تجميع الأوراق المالية المدعومة بالرهن العقاري الثانوي معًا في كيان غامض يُعرف باسم "التزام الدين المضمون collateralized debt obligation". ولكن منذ الانهيار، كبح المنظمون الفيدراليون هذه الانتهاكات، وعادت أسواق الأوراق المالية المدعومة بالأصول إلى الازدهار مرة أخرى؛ حيث تبلغ قيمة سوق الأوراق المالية المدعومة بالرهن العقاري في الولايات المتحدة اليوم قرابة 9 تريليونات دولار، وتبلغ قيمة سوق الأوراق المالية المدعومة بالأصول 1.4 تريليون دولار. وقد أتاح جذب هذه المبالغ الهائلة من رأس المال للأمريكيين الانخراط في أنشطة بتكلفة أولية لا يمكنهم عادةً تحملها. على سبيل المثال، استطاع 14٪ فقط من المستهلكين شراء السيارات بشكل مباشر في عام 2015، مقابل حصول 55٪ على قرض سيارة، بينما قاد 31٪ سيارات من دون تملّكها من خلال أنظمة عقود إيجار السيارات.24 تموّل شركات السيارات القروض والإيجارات للمستهلكين، ثم تبيع الأوراق المالية المدعومة بالأصول في أسواق السندات، ما يحرّر رأس المال لتقديم المزيد من القروض والإيجارات. (ومع ذلك، حذّر بعض المحللين من أنّ ارتفاع إقراض السيارات عالية المخاطر قد أدّى إلى تضخيم فقاعة بورصة خطيرة مدعومة بأصول السيارات، في انتظار انفجارها)25.

قد يكون نجاح صناعة السيارات في الترويج لعقود إيجار السيارات والقروض نموذجًا لصناعة الطاقة الشمسية، ولكن بشرط أن تتجنّب بدقّة ممارسات الإقراض المحفوفة بالمخاطر. وبالتأكيد فإن

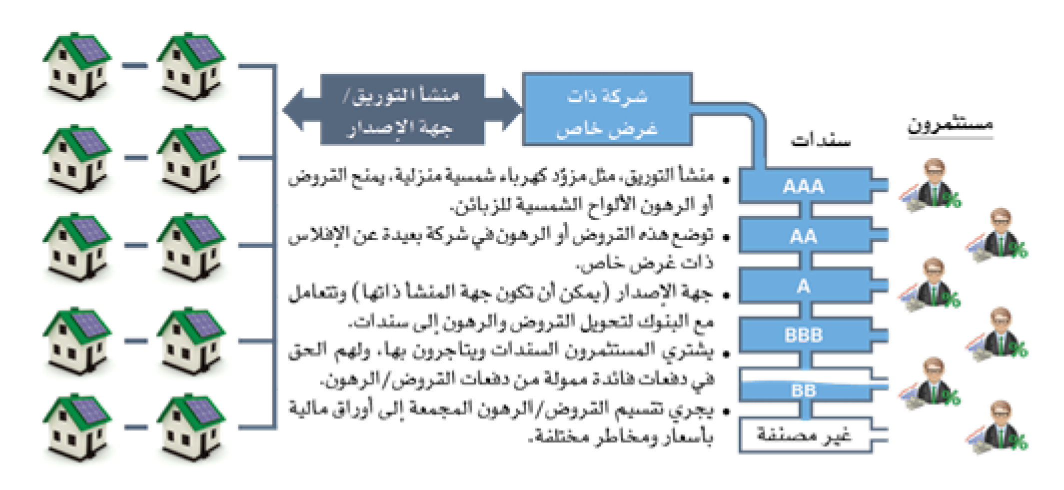
قئتيّ الأصول هذه تُقيّمان بشكل نسبي. كان متوسّط سعر بيع السيارة الأمريكية في عام 2015م بما يزيد على 30 ألف دولار، ويقدّر متوسط تكلفة تركيب الطاقة الشمسية السكنية في كاليفورنيا قرابة 20 ألف دولار[26] [27]. وكما هي الحال في صناعة السيارات، تؤثّر كلّ من عقود الإيجار والقروض بصورة مهمّة في تمويل تركيبات الطاقة الشمسية الموزّعة؛ فقد تم تمويل ما يقرب من نصف الطاقة الشمسية السكنية في الولايات المتحدة في عام 2016م من قبل الشركات التي احتفظت بملكية الألواح الشمسية، مثل سولار-سيتي (التي صارت الآن جزءًا من تسلا)، بينما يمتلك العملاء النصف الآخر من ألواح الطاقة الشمسية العملاء مباشرة عبر قروض تمويلية. ومع انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية، يفضّل العملاء بشكل متزايد امتلاك أنظمة الطاقة الشمسية الخاصّة بهم بدلًا من تأجيرها، وكان من المتوقع أن يمتلك ثلثا العملاء الجدد أنظمة الطاقة الشمسية الخاصّة بهم بحلول عام 2019م[28]، لكن قدرة مزوّدي الطاقة الشمسية على تقديم قروض للعملاء محدودة بميزانياتهم العمومية المتواضعة.

وهنا يأتي دور التوريق؛ حيث إنّ التدفّق النقدي الثابت الذي يسدّده العملاء على شكل مدفوعات شهرية على مدى سنوات عدة، يجعل استثمارات الطاقة الشمسية الموزّعة مناسبة جدًّا بالنسبة إلى مؤسسات الاستثمار[29]. وإذا كان بمقدور موفّري الطاقة الشمسية بيع قروض وعقود إيجار مضمونة للمستثمرين، فيمكنهم التوسّع بسرعة لخدمة أعداد هائلة غير مستغلة في أسواق توزيع الطاقة الشمسية. وقد توصلت إحدى الدراسات التي أجريت في عام 2015 للمباني في جميع أنحاء الولايات المتحدة، إلى أنّ الطاقة الشمسية على الأسطح لديها القدرة التقنية على تشغيل 40٪ من الطلب الوطني على الكهرباء[30]. ويبدو هذا الرقم كبيرًا للغاية، لكنه يعطي انطباعًا عن حجم النمو الذي تحتاج أن تصل إليه الطاقة الشمسية على الأسطح من وضعها الحالي في توفير جزء بسيط فقط من نسبة مئوية من الطاقة الأمريكية. ومع انخفاض تكلفة الطاقة الشمسية على الأسطح، ارتفع عدد المنازل والشركات الأمريكية التي تقوم بتركيب الطاقة الشمسية، ما أدّى إلى نموّ السوق السنوية بأكثر من 40٪ من عام 2008م إلى عام 2014م[31]. وقد تضاعفت اليوم أعداد الألواح الشمسية الموجودة على أسطح المنازل السكنية مقارنة بالمباني الكبيرة[32]. وعلى الرغم من أنّ النمو كان مرتبطًا بتوافر التمويل، فلا تزال هناك إمكانات كبيرة غير مستغلة حتى الآن.

توجد أيضًا إمكانات هائلة لتوسيع الطاقة الشمسية على الأسطح خارج الولايات المتحدة، في كلّ من العالمين المتقدّم والنامي؛ فقد حدّدت الهند على وجه الخصوص هدفًا صارمًا يتمثّل في 40 جيجاوات من الطاقة الشمسية على الأسطح بحلول عام 2022م، ولكن يظلّ الوصول إلى التمويل هناك محدودًا أيضًا، ما يشكّل عائقًا كبيرًا أمام نمو الطاقة الشمسية على الأسطح.[33]

شهدت عملية التوريق لزيادة رأس مال المقترض من أجل نشر الطاقة الشمسية إقبالًا كبيرًا في الولايات المتحدة؛ فمن عام 2013م إلى عام 2016م، جمع موزّعو الطاقة الشمسية بقيادة سولار سيتي SolarCity، أكثر من مليار دولار من خلال بيع الأوراق المالية المدعومة بأصول سكنية

للطاقة الشمسية في أسواق السندات.34 ويقوم مزوّد الطاقة الشمسية في عملية التوريق بتجميع مجموعة متنوّعة من أدوات الدين لتركيبات الطاقة الشمسية على الأسطح من خلال منشأت ذات أغراض خاصة، وهي وسيلة لحماية القروض حتى لو تعرّض مزوّد الطاقة الشمسية للإفلاس (الشكل 4.3). ثم يصدر المزوّد الأوراق المالية للمستثمرين ذوي الدخل الثابت الذين يتلقون مدفوعات الفائدة المموّلة من التدفّق النقدي من القروض الأساسية. وفور سقوط القروض عن مزوّد الطاقة الشمسية، يستطيع طلب تمويل لمشروع جديد لتركيبات الطاقة الشمسية.



الشكل (4.3): كيف يعمل التوريق الشمسي. (لاحظ أنّ تصنيفات الأوراق المالية على الجانب الأيمن طموحة - حتى عام 2016م، لم ينتج من توريق الطاقة الشمسية إصدار سندات AA أو سندات ذات تصنيف أعلى).

تركز بعض الشركات، مثل موزايك سولار Mosaic Solar، مع تزايد شعبية التوريق، حصريًا على توريق قروض الطاقة الشمسية المركّبة من قبل مزوّدين آخرين.35 من الدلائل الجيدة على أنّ المستثمرين يشعرون بالارتياح تجاه التوريق هو الزيادة المطردة في معدّل السعر المسبق (النسبة المئوية لقيمة ضمان القروض التي يرغب المستثمرون في شرائها في شكل أوراق مالية). وقد ارتفع المعدّل المسبق لتأمين الطاقة الشمسية الجديدة من 62٪ إلى 75٪ بين عامي 2013م و2016م، وبدأت بهذه الوتيرة تقترب من المعدلات المسبقة التي تزيد على 90٪ لتوريد السيارات والرهن العقاري، التي يعرفها المستثمرون جيدًا.36

علاوة على ذلك، ظهر نهج مبتكر يسمّى "التخزين warehousing" لسدّ فجوة النطاق في رأس المال من أجل تشغيل منشآت الطاقة الشمسية في المقام الأول حتى يمكن المضي قدمًا في عملية التوريق. تستلزم هذه الإستراتيجية زيادة رأس المال من المستثمرين والجهات المانحة لتمويل العديد من المطوّرين لإنشاء محفظة أو تكاليف المخزون لمشاريع الطاقة الشمسية على الأسطح، وتوقيع العقود مع العملاء لتقديم القروض الشهرية أو مدفوعات الإيجار. ويمكنها بمجرّد تجميع المخزون، إصدار أوراق مالية وتسديد مستحقات مستثمري المخزون. وقد ساعد جرين بانك Green Bank

في ولاية كنيكتيكت في عام 2014م في توفير خدمة تمويل المخزون، ما يدلّ على الدور الذي يمكن أن يؤدّيه القطاع العام في حشد التمويل الخاص؛ حيث تتطلع بنوك التنمية الدولية الآن إلى نشر إستراتيجية التخزين في العالم النامي؛ لزيادة رأس المال اللازم لبناء مشاريع على الأسطح وتمكينها من التوريق37.

ومع ذلك، لا تزال هناك عقبات تحول دون استخدام التوريق على نطاق واسع بوصفه وسيلة لتمويل توزيع منشآت الطاقة الشمسية؛ فمع ارتفاع أسعار الفائدة في الولايات المتحدة، ارتفعت أيضًا عائدات الأوراق المالية الشمسية الصادرة حديثًا، من 4.8 بالمئة إلى 6.25 بالمئة بين عامي 2013م و2016م، الأمر الذي يجعل زيادة رأس المال أكثر تكلفة، ما قد يضعف نمو توزيع الطاقة الشمسية. يُضاف إلى ذلك أنّ عددًا قليلًا من الشركات لديها محفظة كبيرة ومتنوّعة بما يكفي من أصول الطاقة الشمسية للقيام بعملية التوريق الخاصّة بها. وقد تظلّ سوق هذه الأوراق المالية صغيرة ومفتقرة إلى السيولة إلى أن يبدأ موفّرو الطاقة الشمسية الأصغر بتجميع أصولهم وتوريقها بشكل مشترك، وهو أمر لا يرغبه المستثمرون المحتملون.

قد تؤدّي التغييرات التنظيمية أيضًا إلى إبطاء الزخم وراء التوريق، ويمكن لمالكي الطاقة الشمسية الموزّعة في معظم الولايات الأمريكية، إرسال الطاقة الزائدة التي لا يستهلكونها في الموقع إلى الشبكة، مقابل جزء من الطاقة التي يستهلكونها من الشبكة في أوقات أخرى، في الليل مثلًا. وتسمّى القاعدة التي تسمح بذلك "صافي القياس net metering"، التي تكرهها المرافق. ولأنّ مالكي الطاقة الشمسية يمكنهم تقليل فواتيرهم بمقدار الطاقة، بالكيلوواط/ساعة، التي يرسلونها إلى الشبكة، فإنّ المرافق تجادل بوجه حق بأنّ هؤلاء المستهلكين يتجنّبون الدفع مقابل إنشاء الشبكة وتشغيلها، ومع ذلك لا يزالون يعتمدون على تلك الشبكة عندما تنتج الألواح الشمسية طاقة أقلّ مما يحتاجون إليه.

ضغطت المرافق بشدّة في العديد من الولايات لتعديل صافي القياس وتقليل المعدّل الذي يتمّ فيه تعويض الطاقة الشمسية الزائدة، أو إضافة رسوم إلى فواتير مالكي الطاقة الشمسية لتغطية تكاليف الشبكة. وقد نجحوا في بعض الأماكن، مثل ولاية أريزونا، في إضعاف نمو الطاقة الشمسية السكنية. فإذا تراجع عدد أكبر من الولايات عن صافي القياس، فستقل نسبة التوفير في فواتير المرافق الشهرية في تلك الولايات عن طريق تركيب الطاقة الشمسية. ويعني انخفاض نسبة التوفير أنّ من الصعب على مالكي الطاقة الشمسية سداد قروضهم الشهرية أو مدفوعات الإيجار، ما يقلّل الدخل الذي قد يولّده الضمان المدعوم بالأصول للمستثمرين، وبهذه الطريقة قد تقلّل التغييرات التنظيمية من جاذبية التوريق الجديد.

أما الخطر الأخير وغير المنطقي الذي يواجه التوريق، فهو أنّ سعر تركيبات الطاقة الشمسية تنخفض في الواقع بسرعة كبيرة؛ فقد انخفض سعر تركيب الطاقة الشمسية السكنية في الولايات

المتحدة بين عامي 2009م و2015م إلى النصف؛ من 8 دولارات إلى 4 دولارات للواط،38 وإذا استمرّ هذا الاتجاه، فقد لا يرغب العملاء في الاستمرار في سداد مدفوعات القروض على أحد الأصول الذي انخفضت قيمته السوقية بعد بضع سنوات فقط من تركيبه.

من حسن الطالع، قد يؤدّي ظهور البيانات الضخمة إلى تمكين التوريق ومنعه من التحوّل إلى فقاعة تنفجر فجأة. ولتقليل مخاطر الاستثمار في محافظ مشاريع الطاقة الشمسية الموزّعة، فسيحتاج المستثمرون إلى أكبر قدر ممكن من الأدلة على أنّ منشآت الطاقة الشمسية تعمل كما هو متوقّع على مدار عمرها التشغيلي كاملًا، وأنّ العملاء يسدّدون قروضهم الشهرية أو مدفوعات الرهون بشكل موثوق. ولذلك، بدأت بعض الشركات في تقديم هذه البيانات بشكل دقيق. على سبيل المثال، أنشأت شركة كي.دبليو.إتش لتحليل البيانات ((kWh Analytics قاعدة بيانات لمئات الآلاف من مشاريع الطاقة الشمسية العاملة في جميع أنحاء الولايات المتحدة، 39 ثم نقلت هذه القاعدة إلى شركات التأمين الكبرى التي وافقت على تقديم تأمين ضد أنظمة الطاقة الشمسية التي تنتج طاقة أقلّ مما كان متوقعًا.

بدت شركات التأمين سعيدة بالمشاركة، بعد أن رأت كمًّا هائلًا من البيانات التي تؤكّد أنّ مشاريع الطاقة الشمسية تنتج بالفعل قدرًا من الكهرباء على مدار عام كما تتوقّع النماذج. وبعد تأكّدهم من أنّ مشاريع الطاقة الشمسية ستعمل على النحو المطلوب، لا يحتاج المستثمرون في قروض الطاقة الشمسية المورقة إلا التحسب من تخلف مالكي الطاقة الشمسية عن سداد قروضهم، وهي مخاطرة تُقاس بشكل مباشر لقروض المنازل أو قروض السيارات، ولا ينبغي أن تزعج أسواق السندات أو وكالات التصنيف.

مع توافر المزيد من البيانات، سيتمكّن المستثمرون من الوصول إلى ثروة من الأدلة التي تمكّنهم من تسعير مخاطر الأوراق المالية الشمسية بشكل صحيح ومن دون المبالغة في هذا الخطر؛ فالأدلة هي أفضل طريقة لضمان نمو التوريق الشمسي من خلال الاستثمار المسؤول بدلًا من المضاربة. ومع توافر المزيد من البيانات، يمكن أن تتحوّل الألواح الكهروضوئية من منتج متخصّص يحتاج إلى تمويل خاص إلى ملحق منزلي عادي تمامًا؛ حيث تعتقد إحدى الشركات مثل صن لايت التمويلية Sunlight Financial، أنّه قد يكون من السهل في يوم من الأيام تمويل الألواح الشمسية على الأسطح بمثل سهولة برامج التمويل الخاصّة بشراء أثاث أو تجديد المنازل.

لقد كنت أركّز فيما مضى على تمويل مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الأسطح. لكنّ مثل هذه المشاريع ليست الطريقة الأكثر فاعلية من حيث التكلفة لنشر الطاقة الشمسية، أو تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري؛ حيث بلغ متوسّط تكلفة محطة الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة على نطاق المرافق في عام 2016م، ما يقارب 1.06 دولارًا لكلّ واط، في حين أنّ تكلفة مشروع الطاقة الشمسية السكنية كانت 2.89 دولارًا لكلّ واط (تحقّق مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية

على الأسطح التجارية والصناعية بعض وفورات في حجم الطلب. وعليه، فهي أرخص من مشاريع الأسطح السكنية)40. ويجادل بعضهم بأنّ الطاقة الشمسية على الأسطح تجلب فوائد إضافية للشبكة. على سبيل المثال، تقليل خسائر الطاقة عبر خطوط النقل عندما تنتج الطاقة الشمسية الطاقة بالقرب من مكان استخدامها، أو عن طريق تجنّب الاستثمار في البنية التحتية للشبكة الجديدة باهظة الثمن عن طريق تخفيف الحمل على شبكة، وهي فوائد ممكنة من الناحية النظرية. أما على أرض الواقع فغالبًا ما تزيد الطاقة الشمسية على الأسطح الضغط على الشبكة بدلًا من التخفيف عنها. مثلًا، حدّدت إحدى الدراسات في ولاية كاليفورنيا أنه فقط إذا وُضعت الطاقة الشمسية على الأسطح على نسبة معيّنة من 10 بالمئة من الشبكة، فيمكن أن تساعد في تجنّب الترقيات المكلفة لبنية السبكة التحتية41 . وبشكل عام، تستطيع الطاقة الشمسية تحميل المعدّات المُصمَّمة لتوصيل الطاقة من الشبكة إلى المستهلك عندما يُعيد النظام الشمسي الموجود على السطح الطاقة إلى الشبكة42 . وهذا لا يعني بالضرورة أنّ الأنظمة الشمسية الموزّعة غير اقتصادية؛ إذ يمكن للأنظمة الموزّعة الأكبر (كالتي تبلغ سعتها بضع ميغاواط والمثبّتة على مستوى الأرض في المناطق الحضرية) أن تتمتّع بوفرات في حجم الطاقة، التي تُغّذي قوّتها مباشرة إلى المحطات الفرعية الكهربائية التي يمكنها التعامل مع تدفّق الطاقة بدلًا من التحميل الزائد على الدوائر المجاورة.

ومع ذلك، غالبًا ما تتمتّع الطاقة الشمسية على الأسطح بدعم سياسي قوي، ويرجع ذلك جزئيًّا إلى أنّها تستحدث وظائف محلية أكثر وليس لأنّها مشاريع الطاقة الشمسية الأكبر حجمًا. ومن المحتمل -مع الأخذ في الحسبان رغبات المستهلكين وواقع السياسة- أن تحتلّ الطاقة الشمسية على الأسطح مكانة بارزة حتمًا في المزيج الكلّي للقدرة الشمسية مع نمو الصناعة، بصرف النظر عمّا هو مأمول من الناحية النظرية. ومن الممكن أن يتغيّر هذا المزيج المثالي بفضل التقنية؛ حيث يمكن أن توفّر مشاريع الطاقة الشمسية على الأسطح المستقبلية المتصلة بالشبكة من خلال محوّلات ذكية -على سبيل المثال- فوائد للشبكة أكبر مما توفّره الطاقة الشمسية على الأسطح حاليًّا.

على الرغم من أنّ الطاقة الشمسية على نطاق المرافق أرخص بكثير من الطاقة الشمسية على الأسطح، إلا أن الجدوى الاقتصادية للتركيبات على نطاق المرافق يمكن أن تتحسن أكثر مع المزيد من القروض التمويلية. وأما بالنسبة إلى الطاقة الشمسية على الأسطح، فيمكن أن يؤدّي ظهور البيانات إلى إطلاق تمويل دين رخيص للطاقة الشمسية على نطاق المرافق أيضًا؛ إذ تعدّ المشاريع على مستوى المرافق كبيرة بما يكفي بحيث تكون الشركات قادرة على زيادة تمويل المشاريع من دون تجميع العديد من المشاريع معًا. ومع ذلك، يجب أن تبدو الإستراتيجية الفائزة متشابهة بالنسبة إلى محطات الطاقة الشمسية على نطاق المرافق كما في مشاريع الطاقة الشمسية الموزّعة؛ كإقناع المستثمرين بأنّ مخاطر مشروع الطاقة الشمسية منخفضة من أجل الحصول على قروض منخفضة التكلفة. وإذا كانت شركات التأمين على استعداد لتأمين إنتاج الطاقة من منشأة شمسية كبيرة يتم التعاقد معها لبيع طاقتها إلى متعهّد موثوق (أي عميل للكهرباء من غير المرجح أن يتراجع عن

العقد، مثل مرفق ينقل الطاقة الشمسية إلى المنازل والشركات)، فيمكن أن تتولّد لدى المستثمرين المحتملين ثقة عالية في أنّ التدفّقات النقدية للمشروع ستغطي مدفوعات الفائدة على الدين.

يشبه هذا السيناريو كيفية قيام صناعة الطاقة الكهربائية بتقليل مخاطر محطات الطاقة العاملة بالغاز الطبيعي لجمع تمويل ديون رخيص. وسوف تشتري الشركات تحوّطات مالية لتأمين التكلفة طويلة الأجل لأسعار المدخلات من الوقود وسعر إنتاج الكهرباء، وهو ما يتطلب في الأساس اعتماد سياسات تأمين تضمن بأنّ المصنع لديه القدرة على تحقيق الأرباح كما هو متوقّع.43 ويسمح هذا التأمين للشركة ببناء المصنع وزيادة رأس المال المقترض الرخيص من المستثمرين الذين يقتنعون بأنّ المشروع ينطوي على مخاطر منخفضة.

إلى جانب تقليل مخاطر التأمينات المزعجة، يمكن أن تقلّل البيانات من تكلفة رأس المال المقترض لمجموعة متنوّعة من المشاريع، من ألواح الطاقة الشمسية فوق الأسطح إلى الطاقة الشمسية على نطاق المرافق.44 ومع وجود بيانات كافية حول مقدار الإيرادات التي سيكسبها مشروع ما في منطقة معينة، فقد تتمكّن الشركة من زيادة رأس المال المقترض بناءً على وعد ببناء مزرعة شمسية على قطعة أرض، على غرار طريقة شركات النفط والغاز في رأس المال لحفر الآبار من خلال إقناع المستثمرين بقيمة احتياطياتهم.45 تتمثّل الخطوة التالية في المستقبل في توسيع نطاق جمع البيانات عالية الجودة عن البلدان النامية، حيث يحتاج المستثمرون المتقلبون إلى بيانات أكيدة حتى يضخّوا بارتياح رؤوس أموالهم في الأسواق التي تتمتّع بإمكانات نموّ عالية ومخاطر منظورة عالية أيضًا.

البحث عن شركة عملاقة

كان على الطاولة أمامي ما يقرب من أربعة حبّات من الفطائر الفاخرة- أقول ما يقرب لأني أخذت قضمة من واحدة منها. وبين محاولتي الفاشلة للإمساك بالأعواد الصينية لتناول الطعام، وسيل الأسئلة التي كنت أحاول الإجابة عنها، لم تكن لديّ فرصة كبيرة للاستمتاع بالوجبة. كنت في غرفة طعام فاخرة ذات ألواح خشبية في نادي هونغ كونغ جنتلمن التاريخي، حيث كان الفريق التنفيذي لشركة تشاينا لايت أند باور China Light and Power (CLP) يسألني عن الحالة الحالية لأسواق الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم في عام 2016م، وتوقعاتهم بالنسبة إلى المستقبل إذ يمكن أن تؤثّر إجاباتي في خطط الشركة للتوسّع في الطاقة الشمسية؛ لذا كان على الفطائر المُسيلة للّعاب أن تنتظر.

تُعدّ هذه الشركة واحدة من أكبر شركات الطاقة الكهربائية في آسيا، ولها عمليات تشغيلية في العديد من الدول، وتمتلك تقليديًّا محطات طاقة تعمل بالوقود الأحفوري، معظمها من الفحم. ولكن كما كان الرئيس التنفيذي ريتشارد لانكستر Richard Lancaster، يجادل بشدّة عبر الطاولة، كانت

الأوقات تتغيّر بفضل انخفاض تكلفة الطاقة المتجدّدة والاتفاقيات السياسية التاريخية مثل اتفاقية باريس بشأن تغيّر المناخ. في عام 2007م، قدّمت تشاينا لايت آند باور، تعهدًا رائدًا لخفض كثافة الكربون (أي انبعاثات الكربون لكلّ وحدة من الطاقة المولدة) بنسبة 75٪ بحلول عام 2050م. وربما يكون هذا هو الهدف الأكثر طموحًا لأيّ شركة طاقة كبرى في العالم. وللوفاء بهذا التعهد، أخذت تنشر الطاقة المتجدّدة بقوّة في الصين والهند وأسواق أخرى، وتتخلّص في الوقت ذاته من بعض مصانعها الأحفورية.46 وعلى الرغم من أنّ معظم استثماراتها المتجدّدة كانت في طاقة الرياح، إلا أن التكلفة المنخفضة للطاقة الشمسية لفتت انتباه الشركة، ومن هنا كان اهتمامها بفهم أسواق الطاقة الشمسية المزدهرة في جميع أنحاء آسيا.

يمكن أن تكون شركات بحجم هذه الشركة وامتداداتها مهمّة لمستقبل الطاقة الشمسية على قدر أهمّية وجود المستثمرين الأثرياء الذين ستحتاج الطاقة الشمسية إلى جذبهم؛ فهذه الشركة تمتلك محطات طاقة تبلغ قيمتها أكثر من 25 مليار دولار، ولكن 16٪ منها فقط يعمل في مجال الطاقة المتجدّدة.47 تتمتع هذه الشركات بميزانية عمومية هائلة ورغبة في تحويل ممتلكاتها في السنوات القادمة، وهي على استعداد بصورة حاسمة لتحمّل مخاطر تطوير المشاريع، التي، بمجرد إنشائها، تتحول إلى فرص استثمار ناضجة يستطيع المستثمرون المؤسسيون وضع أموالهم فيها.

هذه العملية مألوفة في أعراف صناعة النفط والغاز؛ فالشركات الكبرى ذات الميزانيات العمومية الكبيرة تستطيع القيام بمراهنات كبيرة على مشاريع البنية التحتية الضخمة في هذا القطاع. ونظرًا إلى أنّ ميزانياتها العمومية تشتمل على الديون وحقوق الملكية من أكبر المستثمرين في العالم، فإنّ كبار المديرين يعملون في الواقع بوصفهم قنوات لرأس المال الذي يوجّهونه لدعم نمو الصناعة48 .

نمت شركة صن إديسون بسرعة كبيرة، وتخملت الكثير من الديون؛ لأنّها كانت تحاول تكرار هذه الإستراتيجية، وكان زوالها في نهاية المطاف بمثابة تذكير بأنّ الشركة كانت بعيدةً جدًّا عن تحقيق القدر الحقيقي اللازم للعمل بوصفها شركة عملاقة. ربما تستطيع شركة طاقة شمسية أخرى أن تتبنى إستراتيجية نمو أكثر دقّة، وتتمكّن من ملء هذا الدور تدريجيًّا بعد عقد أو أكثر في المستقبل، لكنّ شركات الطاقة الكهربائية الكبيرة التي تتطلع إلى التنويع من الوقود الأحفوري تعدّ في الوقت الحالي الكيانات الأفضل موقعًا لتحويل نماذج أعمالها وارتداء عباءة الطاقة الشمسية العملاقة.

في الواقع، لا ينطبق هذا الرأي إلا على بعض الشركات في قطاع الطاقة الكهربائية؛ حيث تأتي شركات الطاقة الكهربائية في نسختين رئيستين، وذلك نتيجة للدفع نحو رفع القيود في جميع أنحاء العالم، ففي معظم القرن العشرين، كان هناك نوع واحد فقط إلى حدّ كبير: كيان المنفعة المتكاملة رأسيًّا. تمتلك هذه المرافق كلًا من محطات الطاقة وخطوط النقل والبنية التحتية لإيصال الطاقة إلى عملائها، وقد تمتّعت باحتكار منطقة خدمة محدودة لبيع منتجها من الطاقة. وبعد ذلك بدأت الأسواق في جميع أنحاء أمريكا الشمالية وأوروبا بتحرير القيود في مطلع القرن الماضي؛ أي إنّها لم تعد

تمنح احتكارًا لمرفق واحد على جميع الأنشطة المتعلقة بالطاقة، فأدى هذا التحرير إلى إعادة هيكلة الصناعة. ولا تزال المرافق التي تنظمها الدولة تحتفظ بالاحتكار لامتلاك شبكة الطاقة وتشغيلها في منطقة خدمتها، لكنّ أسواقًا تنافسية نشأت في هذا الوقت، حيث تعمل الشركات الخاصّة التي تمتلك محطات توليد الطاقة على بيع الكهرباء، وتشتريها المرافق المنظمة. هذان النوعان من الشركات؛ المرافق المنظمة التي تحتكر شبكة الطاقة في منطقة محدودة والشركات غير المنظمة التي تمتلك محطات توليد الطاقة، التي غالبًا ما توجد في بلدان متعدّدة، تستجيب لارتفاع الطاقة الشمسية بطرق مختلفة كثيرة.

إن من غير المحتمل أن تصبح المرافق المنظمة شركات طاقة شمسية عملاقة؛ حيث يميل رأيها في الطاقة الشمسية على نطاق المرافق إلى أن يكون إيجابيًّا إلى حدّ ما؛ لأنها تستطيع شراء كهرباء رخيصة من مزارع الطاقة الشمسية (على الرغم من أنّ قوانين الدولة قد تتطلّب منها شراء أكثر مما تحتاجه). إلا أنها تحتفظ برأي متشدّد بشأن الطاقة الشمسية الموزّعة أو اللامركزية التي غالبًا ما تنظر إليها بريبة وخوف أحيانًا.

المرافق الخاضعة للتنظيم في الولايات المتحدة هي التي تمارس الضغط للتراجع عن صافي القياس، وأحد مخاوفها هو ما يسمّى بدوامة الموت death spiral، حيث يُركّب العملاء ألواح الطاقة الشمسية على الأسطح، ويخفّضون فواتيرهم، ويتسبّبون في ارتفاع فواتير عملاء الطاقة غير الشمسية لتغطية تكاليف الشبكة. وهذا الارتفاع، بدوره، يجعل الطاقة الشمسية عرضًا أكثر جاذبية من شراء الكهرباء من الشبكة، ما يؤدّي إلى زيادة عدد العملاء الذين يخفضون فواتيرهم ورفع قيمة فواتير المجموعة المتبقية المتضائلة. إن احتمال وجود عدد أقل وأقل من العملاء الذين يشترون الكهرباء التي تتدفّق عبر الشبكة يجعل المرافق التي تمتلك الشبكة تنظر إلى الطاقة الشمسية على أنها تهديد تنافسي.

بالإضافة إلى الطاقة الشمسية الموزعة، يبدو أنّ هناك اتجاهًا جديدًا يسمّى "الطاقة الشمسية المجتمعية community solar" أو الطاقة الشمسية المشتركة الذي يشكل تهديدًا للمرافق. في هذا النظام، يمكن أن يتّحد المستهلكون معًا لامتلاك مجمع للطاقة الشمسية أو تأجيره على نطاق واسع. ويستطيع المستهلكون في العديد من الولايات الأمريكية بعد ذلك استخدام صافي القياس لتعويض مشترياتهم من الطاقة من الشبكة بالطاقة الناتجة من مشروع الطاقة الشمسية المشتركة. لكنّ الجدوى الأقتصادية من مشروع الطاقة الشمسية واسع النطاق غالبًا ما تكون أفضل بكثير من الخلايا الشمسية الصغيرة المثبتة على الأسطح. لذلك فإنّ صافي القياس يوفّر تعويضًا سخيًّا للغاية لمستهلكي الكهرباء من مشروع الطاقة الشمسية المجتمعية، ما يؤدّي إلى خفض فواتير الكهرباء وتسريع "دوامة الموت". لقد ارتفعت الطاقة الشمسية في الواقع في مجتمعات الطاقة الشمسية؛ حيث شكّلت ما يقرب من 5٪ من التركيبات الشمسية السنوية في الولايات المتحدة في عام 2017م بعد أن كانت قريبة من الصفر في عام 2015م49 .

ولأن اهتمامها يتركز على منع الطاقة الشمسية الموزّعة من الاستحواذ على حصّتها من العملاء، فإنّ المرافق المنظّمة لا تحقّق سوى نجاحات محدودة لتصبح لاعبًا في صناعة الطاقة الشمسية المتنامية. أما المرافق التي قد تكون مهتمّة بتحقيق نجاحات فستواجه صعوبة بهذا الخصوص؛ إذ لا يُسمح للمرافق المنظمة في الدول غير الخاضعة للتنظيمات ذات الأسواق التنافسية للطاقة بالجملة، بتطوير وامتلاك مشاريع طاقة شمسية كبيرة تبيع الطاقة في سوق الجملة. بالمقابل، توقّع المرافق المنظّمة اتفاقيات لشراء الطاقة مع مطوّري مشاريع الطاقة الشمسية الكبيرة، وغالبًا ما يكون ذلك من أجل الوفاء بالالتزامات بموجب تفويضات الطاقة المتجدّدة الحكومية. يُضاف إلى ذلك أنه يصعب على المرافق المنظمة تسويق الطاقة الشمسية الموزّعة وتركيبها؛ لأنّها قد تتعارض مع قوانين مكافحة الاحتكار بسبب وضعها الاحتكاري داخل منطقة خدمتها50.

ومع ذلك، توجد بعض نماذج من المرافق المنظمة التي تتابع ابتكار نموذج الأعمال، والاستفادة من بعض القيمة السوقية للطاقة الشمسية المتنامي. على سبيل المثال، تمتلك المرافق كمّيّات كبيرة من البيانات عن العملاء في منطقة خدمتها، في حين أنّ الحصول على العملاء يُعدّ عنصرًا متزايدًا من التكاليف التي يواجهها مقدّمو خدمات الطاقة الشمسية الموزّعة.51 وتستطيع المرافق العامة من خلال الشراكة مع مزوّدي الطاقة الشمسية وخفض مبيعاتها، جني الأموال حتى مع قيام المزيد من العملاء بتركيب مرافق الطاقة الشمسية الموزّعة.52 وتستطيع أيضًا منح تسهيلات للعملاء في الدفع مقابل تحديثات الطاقة النظيفة، مثل الألواح الشمسية أو التعديلات في المنازل لتوفير الطاقة، بحيث تكون على شكل أقساط في فاتورة الكهرباء الشهرية53 .

وعلى العكس من المرافق الخاضعة للتنظيم، تتوسّع شركات الطاقة غير المنظّمة بقوة في مجال الطاقة الشمسية. وغالبًا ما تكون المرافق الخاضعة للتنظيم في الولايات المتحدة، شركات تابعة لشركات قابضة تمتلك شركات فرعية أخرى غير خاضعة للتنظيم تتمتع بحرّية بناء محطات الطاقة وبيع الطاقة في الأسواق التنافسية. والعديد من هؤلاء النظراء غير المنظّمين للمرافق المنظّمة - مثل Berkshire Hathaway Energy ,Southern Power ,Duke Energy Renewables NextEra Energy Resources ,Renewables -يستثمرون بكثافة في الطاقة الشمسية. وفي الحقيقة أن نصف مشاريع الطاقة الشمسية على نطاق المرافق في الولايات المتحدة في عام 2016م كانت مملوكة لفروع غير منظمة تابعة لشركات المرافق القابضة. ويتوقّع المحلّلون أنها ستزيد حصّتها في سوق الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة.54 وكان لدى العديد من هذه الشركات تاريخيًا مولدات تعمل بالوقود الأحفوري، لكنها تتزاحم الآن للحصول على أرخص مصدر لتوليد الطاقة في الولايات المتحدة- الطاقة الشمسية.

وتحدث في الخارج توجّهات مماثلة؛ فقد صارت الشركات التي كانت في السابق تمتلك محطات طاقة تقليدية، تقود طفرة في الاستثمار في الطاقة الشمسية؛ حيث تقوم شركة إينل Enel المعروفة سابقًا باسم المرفق الوطني الإيطالي، التي توسّعت حتى صارت قوّة عالمية منذ أن حرّرت إيطاليا

قطاع الطاقة لديها، بمحاولة حثيثة لتطوير مشاريع الطاقة الشمسية في جميع أنحاء أمريكا اللاتينية بأسعار قياسية منخفضة.55 لكنّ الشركات الصينية - على سبيل المثال، تشاينا لايت آند باور في هونغ كونغ وشركة ثري جورجز الصينية China Three Gorges Corporation- هي التي تهيمن على الاستثمارات في الطاقة الشمسية حول العالم؛56 إذ تمتلك جميع شركات الطاقة هذه ميزانيات هائلة، وبدأت باستخدامها بوصفها قناة لتوجيه الاستثمار نحو الطاقة الشمسية.

وعلى الرغم من أنّ شركات الطاقة الكهربائية التي تتطلع إلى تنويع مصادرها بعيدًا عن الوقود الأحفوري هي المرشّح الأقرب لتكون عمالقة الطاقة الشمسية، إلا أنها لا تُعدّ الشركات الوحيدة التي تغريها الطاقة الشمسية؛ فقد راهن أحد الوافدين على الصناعة مؤخّرًا (عملاق التقنية الياباني سوفتبانك Softbank) على الطاقة الشمسية بصورة هائلة. اقتحمت مجموعة سوفتبانك مجال الطاقة الشمسية بقيادة أغنى رجل في اليابان (ماسايوشي سون Masayoshi Son) بعد كارثة محطة فوكوشيما للطاقة النووية في العام 2011، حيث طوّرت 500 ميجاوات من الطاقة الشمسية في البلاد، ثم تعهّدت بعد ذلك باستثمار 20 مليار دولار في الهند. اجتمعت في نيودلهي في أواخر عام 2015م مع الرئيس التنفيذي لفرع شركة سوفتبانك؛ رامان ناندا، وهو من قدامى موظفي شركة ماكنزي الأمريكية في استشارات الإدارة الإستراتيجية الذي تلقى تعليمه في جامعة أكسفورد. أتذكر أنني سألت نفسي عمّا إذا كانت سيرته الذاتية الرائعة قد تعيقه عن النجاح في الأجواء الصعبة والمتقلبة لعالم الأعمال الهندي، ولكنّه سرعان ما بدّد شكوكي. عندما وصلت في اليوم التالي إلى اجتماع في وزارة الطاقة، صادفت رامان الذي كان يقوم بالجولات قبل تقديم عطاءات في مزاد حكومي كبير. وبعد بضعة أيام، فازت مجموعة سوفتبانك بعقد كبير لبناء مشروع الطاقة الكهروضوئية على نطاق المرافق في ولاية أندرا براديش الهندية. ثمّ أرسل لي رامان مزهوًّا في غضون عام، صورة قمر صناعي من جوجل إيرث لمواقع ثلاثة مشاريع متجاورة؛ كان اثنان منها خاليين، في انتظار البناء عليهما من قبل الشركات المحلية بطيئة الحركة، ولكنّ موقع سوفتبانك كان مليئًا بالفعل بـ 350 ميجاوات من الألواح الشمسية المركّبة.

إلى جانب مجموعة سوفتبانك، دخلت شركات التقنية العالمية الأخرى مجال أعمال الطاقة المتجدّدة؛ فقد أنشأت كلّ من شركة أبل، وجوجل، وأمازون، شركات فرعية للطاقة اعتبارًا من عام 2016م، واستثمرت بقوة في ربط مراكز بياناتها بطاقة الرياح والطاقة الشمسية لتقليل تكاليف الكهرباء المتقلبة والمتزايدة.57 أما من خارج عالم التقنية، فقد انسحبت منتجعات إم جي إم MGM Resorts، التي تستحوذ على معظم قطاع الترفيه في لاس فيجاس، من شركة NV Energy وهي منشأة خاضعة للتنظيم يملكها وارن بافيت Warren Buffett، وتخطّط لمضاعفة استهلاكها للطاقة المتجدّدة الآن حيث يمكنها التصرف وإبرام عقود طاقة لخمسة عشر كازينو؛ بعدما لم تعد أسيرة لعملاء المرافق.58 ربما ينتشرهذا التوجّه بشكل سريع، حيث إنّ ثلاثة أرباع أكبر 100 شركة بحسب تصنيف مجلة Fortune، حدّدت أهدافًا للطاقة المتجدّدة أو الاستدامة. وقد شكّلت الشركات

في عام 2015م، أكثر من خُمس الطاقة المتجدّدة المضافة إلى شبكة الولايات المتحدة، ويُعدُّ هذا ارتفاعًا جيدًا بعد أن كان لا شيء تقريبًا في عام 2012م59 .

يمكن أن يضيف اهتمام الشركات المتزايد بالطاقة المتجدّدة صداعًا آخر للمرافق الخاضعة للتنظيم، التي هي بالفعل في حالة ذهول من فقدان عملاء المنازل بسبب الطاقة الشمسية الموزعة. ويمكن أن تواجه الآن نزوحًا جماعيًّا من المستهلكين من الشركات إلى الطاقة الشمسية على نطاق المرافق. ومن المثير للسخرية في الواقع أنّ المرافق المنظّمة هي فئة وحيدة من الشركات التي لا تستفيد من طفرة الطاقة الشمسية. وبصرف النظر عن هذه الشركات، توجد مجموعة متنوّعة بشكل ملحوظ من الشركات التي تستثمر في الطاقة الشمسية؛ وتضمّ شركات الطاقة غير الخاضعة للتنظيم، وعمالقة التقنية، وتجار التجزئة مثل وول مارت، وعمالقة الصناعة مثل داو كيميكال. وقد يمثّل هذا العدد الهائل من الشركات نموذجًا جديدًا لتعزيز نمو الطاقة الشمسية، ما يجعل النموذج العملاق، الذي كان ناجحًا جدًا بالنسبة إلى قطاع النفط والغاز، من الطراز القديم. لذلك فإنّ موجة من الشركات التي ترغب في تغيير نماذج أعمالها للاستثمار في الطاقة الشمسية هي علامة واعدة لمستقبل هذه الصناعة.

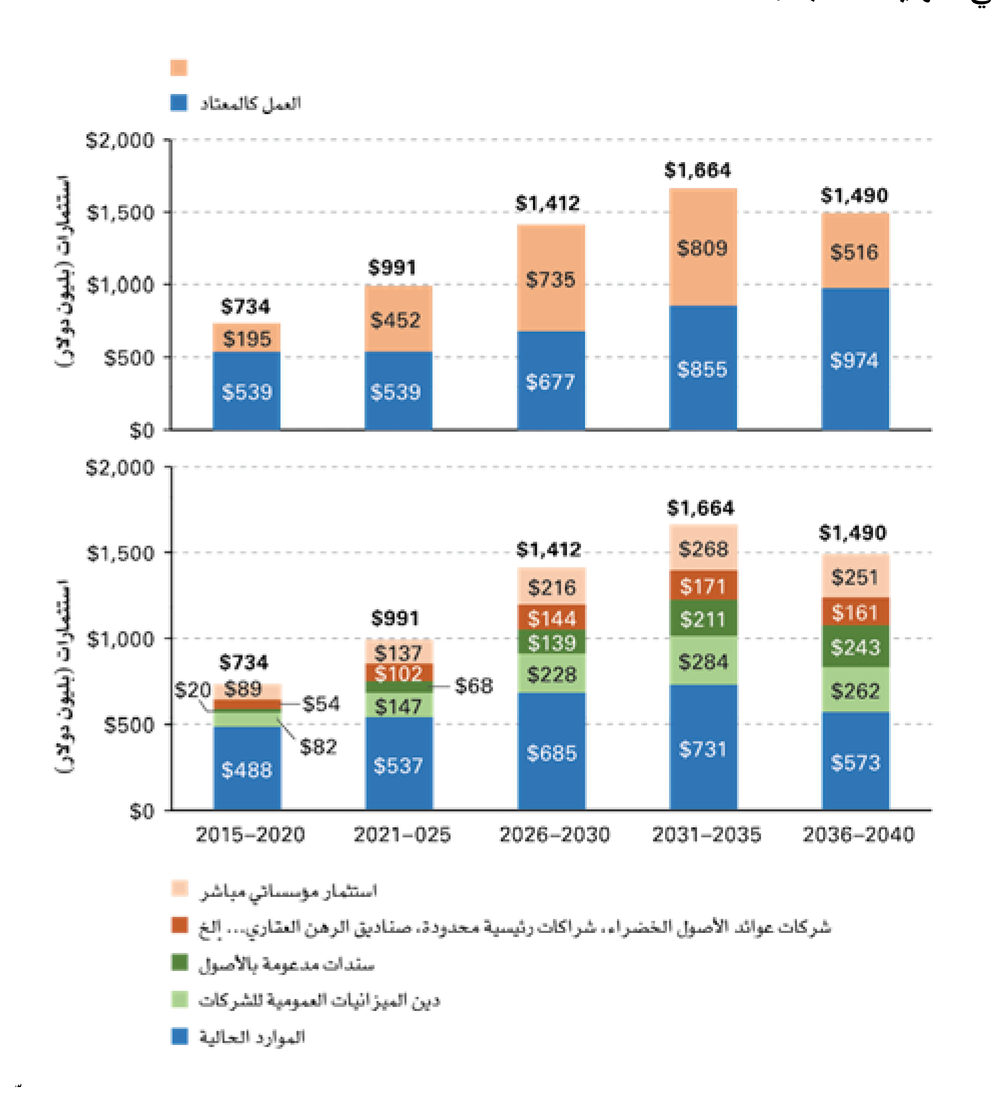
القطاع العام بوصفه عجلة التوازن

أثّرت الحكومات والمؤسّسات الدولية حتى الآن بصورة مهمّة في توجيه رأس المال نحو الطاقة الشمسية. ويجادل كثيرون بأنّ القطاع العام سيستمر في القيام بدور تكاملي؛ حيث تبحث صناعة الطاقة الشمسية عن مصادر جديدة لرأس المال من مستثمرين جدد وشركات لدعم نموّها المستمر. وفي الحقيقة أن الكيانات العامة من مستويات مختلفة، بدءًا من الحكومات البلدية ومرورًا ببنوك التنمية الدولية، كشفت عن أدوات مالية مبتكرة لتحريك التمويل الخاص، فعلى الرغم من شحّ التمويل العام، إلا أنها يمكن أن تفتح المزيد من رأس المال الخاص إذا ما وُظِّفت بذكاء. لذلك، يستطيع القطاع العام على المدى القريب التأثير بصورة جوهرية في جذب رأس مال خاصّ جديد. أما على المدى الطويل؛ أي بعد خمس إلى عشر سنوات، فسيكون القطاع العام قد نجح إذا ما ابتعد عن المشهد أو خفف من حضوره، كما أن صناعة الطاقة الشمسية الناجحة ستستمر حقًّا في النمو بالكامل من خلال تدفّقات رأس المال الخاص والأسواق الفعّالة.

كانت مهمة القطاع العام صعبة بهذا الخصوص؛ فقد قدّم حتى الآن ما يقرب من 15٪ من إجمالي تمويل الطاقة المتجدّدة. وبالنظر إلى المبالغ الهائلة من رأس المال اللازمة لتمويل نمو الطاقة الشمسية بوصفها مصدر طاقة رئيسًا، فإنّ نسبة التمويل العام لن تزداد بالتأكيد، وعلى الأرجح أنّه سيتعيّن عليها في الواقع أن تنخفض في ظلّ قيود الموازنات العامة. لذا سيحتاج القطاع العام،

بطريقة ما، إلى عمل المزيد بموارد أقل، أي تحريك المزيد من رأس المال الخاص مع تمويل عام أقلّ نسبيًّا.

يُعدّ ذلك أمرًا بالغ الصعوبة؛ حيث تقدّر شركة ماكينزي أن فجوة الطاقة السنوية على مستوى العالم بين الإنفاق الحالي والإنفاق المطلوب لبناء البنية التحتية لقطاع الطاقة اللازمة للحدّ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بشكل سريع، تبلغ 1.5 تريليون دولار. ويتركز معظم هذه الفجوة في الاقتصادات الناشئة.60 لكنّ منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية تقدّر في الوقت ذاته أنّه نظرًا إلى أنّ مؤسسات الاستثمار متعطشة لتدفق نقدي مستقر وطويل الأجل، فإنّ صناديق التقاعد وشركات التأمين يمكن أن تستثمر 2.8 تريليون دولار سنويًّا في الطاقة النظيفة (انظر الشكل 4.4)61. وتدفع تفويضات الاستدامة نسبة متزايدة من مجتمع الاستثمار. بعبارة أخرى، ينتظر المستثمرون فقط أن تتطابق التفويضات مع المشاريع المناسبة، وأن يشعروا بالراحة مع الاستثمار في الطاقة الشمسية. يتمثل دور القطاع العام في أن يكون عجلة التوازن للقطاع الخاص؛ لدفع نمو الطاقة الشمسية للعمل بمفرده في النهاية مستقبلًا.



الشكل (4.4): مستويات الاستثمار المطلوبة في الطاقة الشمسية للحدّ من تغيّر المناخ. يرسم المخطّط العلوي مستويات الاستثمار في الطاقة الشمسية في إطار سيناريو العمل كالمعتاد، ويقارن تلك المستويات مع المستويات الأعلى المطلوبة حتى عام 2040م؛ وذلك لإبقاء العالم على المسار الصحيح للحدّ من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 2 درجة مئوية. ويوفّر الرسم البياني السفلي تفصيلًا قابلًا للتطبيق لمستويات الاستثمار المطلوبة حسب المصدر. في الوقت الحالي، تعدّ القروض المصرفية الخاصّة والاستثمارات المباشرة في الأسهم من خلال صناديق الأسهم الخاصّة؛ على سبيل المثال، أكثر مصادر رأس المال شيوعًا. ولكن في المستقبل، ستكون هناك حاجة إلى مصادر جديدة للديون ورأس مال الأسهم. ويُعد تمويل دين الميزانية العمومية للشركات والتوريق المدعوم بالأصول طرقًا لتوجيه رأس مال الديون من أسواق الدين العام نحو مشاريع الطاقة الشمسية على نطاق المرافق وتوزيعها. ومن الممكن أن يأتي رأس المال السهمي من أدوات مثل شركات عوائد الطاقة الخضراء التي تمكّن المستثمرين من شراء أسهم مجموعة من مشاريع الطاقة المتجدّدة في أسواق الأسهم العامة. أخيرًا، على الرغم من أنّ المستثمرين المؤسّسيين الأثرياء يستثمرون معظم رؤوس أموالهم في الأسواق العامة، إلا أنّ لديهم أيضًا قدرة كبيرة على توفير كلّ من الديون ورأس المال السهمي مباشرة، من خلال القروض المباشرة وملكية حصص في المشاريع.

المصدر: Bloomberg New Energy Finance (2016).

قادت بنوك التنمية متعدّدة الأطراف Multilateral Development Banks (MDBs) الطريق حتى الآن، ولا يزال في جعبتها بعض الحيل. ولا تكون هذه البنوك والبنك الدولي، أكثر فاعلية إلا عندما تُقلّل المخاطر التي يواجهها المستثمرون عند الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية. وتتمثّل إحدى الأدوات التي يمكنها استخدامها في توفير ضمانات القروض، ما يقلّل القلق الذي قد يساور المستثمر الخاص بشأن سداده مقابل تقديم قرض لبناء مشروع للطاقة الشمسية. ومن الممكن أن تتّخذ الضمانات أشكالًا مختلفة كالحماية من المخاطر السياسية مثل مصادرة الحكومة للأصول. وهناك نوع آخر يحمي ضد مخاطر مشتري المنتج، وهو الالتزام بدفع كامل مبلغ القرض إذا تعسّر مشروع الطاقة الشمسية لأن العميل المشتري (أحد المرافق، مثلًا) نكث بعقد شراء الطاقة الشمسية. وعلى الرغم من أنّ ضمانات بنوك التنمية متعدّدة الأطراف شائعة، فإنّ 4٪ منها فقط تستخدم للمساعدة في تمويل الطاقة المتجدّدة. وعليه، فإنّ الغالبية تذهب إلى مشاريع الطاقة الكهرومائية، ويذهب 7٪ فقط إلى الطاقة الشمسية؛ ولذلك يوجد مجال كبير لبنوك التنمية متعدّدة الأطراف لتوسيع نطاق استخدامها للضمانات، وتشجيع المزيد من الاستثمار في الطاقة الشمسية62.

يستطيع بنك التنمية متعدّد الأطراف أيضًا حشد الاستثمار الخاص من خلال إستراتيجية تُعرف باسم "القرض المشترك أو قرض التجمع البنكي loan syndication"، التي يقود فيها البنك تحالفًا من المستثمرين لتمويل مشروع الطاقة الشمسية. ربما كان هؤلاء المستثمرون حذرين للغاية من الاستثمار بأنفسهم، لكنّهم سيكونون سعداء لفعل ذلك لشعورهم بالأمان؛ وذلك لأن العديد من المستثمرين الآخرين يتحمّلون المخاطرة بشكل مشترك معهم بقيادة بنك تنمية متعدد الأطراف الذي يقدم معظم الدعم اللازم. على سبيل المثال، قامت مؤسّسة التمويل الدولية (International IFC-Finance Corporation) في الأردن، وهي ذراع لمجموعة البنك الدولي، بجمع مجموعة من البنوك في عام 2014م؛ لتقديم أكثر من 200 مليون دولار في شكل قروض لسبعة مشاريع للطاقة الشمسية63. وللمضي قدمًا، فإنّ كلّا من القروض المشتركة والضمانات يعدّان نهجين

واعدين وغير مكلفين لبنوك التنمية متعدّدة الأطراف لطمأنة المستثمرين المؤسَّسِيين الجدد لتمويل الطاقة الشمسية، لا سيّما في الأسواق الناشئة.

بالإضافة إلى بنوك التنمية متعدّدة الأطراف، تعمل الحكومات في جميع أنحاء العالم على طرح طرق مبتكرة لحشد التمويل الخاص للطاقة النظيفة. مثلًا، يقدّم نيويورك جرين بانك New York Green Bank قروضًا بأسعار السوق لمشاريع الطاقة الشمسية ذات الجدوى الاقتصادية، ولكنها لا تُعدّ سائدة بما يكفي لتمويل البنوك الخاصّة.

إحدى الإستراتيجيات التي ابتكرتها بنوك التنمية متعدّدة الأطراف، التي سرعان ما تبنّتها الحكومات، هي إصدار "سندات خضراء green bonds"64 وهي في جوهرها مثل السندات العادية التي يستطيع المستثمرون شراؤها والمتاجرة بها بشرط استخدام عائداتها في مشاريع مستدامة. وتقوم الحكومات المحلية داخل الولايات المتحدة على الصعد كافة، بدءًا بالصعيد الوطني، والولاية/المقاطعة، والبلدية، بإصدار هذه السندات بانتظام لجمع التمويل بتكلفة منخفضة يمكن استخدامها في مشاريع الطاقة النظيفة. وتُعدّ السندات الخضراء مثالًا جيدًا على كيفية قيام القطاع العام بتحفيز النشاط الخاص الذي سرعان ما يصير مكتفيًا ذاتيًّا. وتصدر هذه السندات الآن أيضًا المرافق والشركات والبنوك، التي أُصدرت في عام 2016م سندات خضراء بأكثر من 100 مليار دولار أمريكي، التي اعتُمدت لتلبية مجموعة من المبادئ التي وضعتها البنوك الكبيرة تسمح بتسمية السندات بـ"الخضراء". وبالإضافة إلى ذلك، أُصدِرت سندات غير مصنّفة بقيمة تقارب 600 مليار دولار تموّل معظمها مشاريع الاستدامة65 .

سيحتاج القطاع العام في العالم النامي على وجه الخصوص، إلى تقديم حوافز أو ضمانات لتشجيع المستثمرين من القطاع الخاص الذين غالبًا ما يكونون غير ملمّين بالأسواق الناشئة، الذين يخشون من المخاطر المتزايدة. لكن حكومات البلدان النامية قد تعاني ضائقة مالية؛ لذا يجب أن تكون الحوافز التي تختارها فعّالة للغاية في تعويض العديد من الدولارات الخاصّة مقابل كلّ دولار من المال العام.

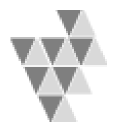
تقدّم الهند مثالًا جيدًا على هذه الضرورة الحتمية التي تتطلب ضخّ مبالغ كبير من رأس المال لتحقيق أهدافها الشمسية. ومن أجل تشجيع المستثمرين المحليين على تقديم قروض بشروط لائقة، تستطيع الحكومة الهندية توسيع نطاق استخدامها لضمانات الائتمان الجزئية، ما يقلّل من تعرّض البنك المحلي لاحتمالية التخلف عن السداد66. وقد أعلنت الحكومة عن خطط لطرح صندوق تحوّط للعملات؛ للحماية من تقلبات أسعار الصرف، لجذب المستثمرين الأجانب؛ حيث إنّ مخاطر العملة تُخيف المستثمرين الأجانب الذين لا يريدون أن تنخفض قيمة مشاريع الطاقة الشمسية التي موّلوها؛ بالدولار الأمريكي، مثلًا. إن هذه المخاطر يمكن أن تضيف ما يصل إلى سبع نقاط مئوية إلى الحدّ الأدنى لمعدّل العائد الذي سيتحمّله المستثمرون، ما يمنعهم من الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية

الجذابة67. أما من خلال عرض مشاركة بعض مخاطر العملة مع المستثمرين الأجانب، فتستطيع الحكومة زيادة عدد المشاريع التي يكون تمويلها من هؤلاء المستثمرين منطقيًّا.

أما المخاطر الأخرى التي تعرقل مناخ الاستثمار فتتعلق بقطاع الطاقة الهندية المتردي؛ فمرافق الكهرباء في وضع مالي سيئ، ما يثير مخاوف من أنها قد تتراجع عن عقود شراء الطاقة من مشاريع الطاقة الشمسية. كما فشلت الهند أيضًا في الاستثمار في ترقية الشبكة التي قد تكون غير قادرة على تحمُّل تدفّق الطاقة الشمسية، فإذا نجحت الحكومة الهندية في إصلاح قطاع الطاقة، وربما تحرير مرافقها كما فعلت كثير من دول العالم المتقدّم، فإنها ستقلّل بشكل كبير من المخاطر التي تواجه المستثمرين في مشاريع الطاقة الشمسية.

يجب أن تكون هذه الأنواع من الإصلاحات الاقتصادية الهيكلية، التي قد تجعل مشاريع الطاقة الشمسية مربحة حتى من دون حوافز، الأولوية الأولى للحكومات في جميع أنحاء العالم النامي. كما أن الدور المناسب للقطاع العام هو توفير عجلة التوازن لمستثمري القطاع الخاص في الطاقة الشمسية، وليس خلق الاعتماد على عكاز القطاع العام.

في ضوء هذه المعطيات، يُعدّ العقد المقبل عقدًا حاسمًا لصناعة الطاقة الشمسية؛ لكن من أجل تمويلها لتتمكن من الصعود بوصفها منافسًا رئيسًا في ميدان الطاقة، فإن على هذه الصناعة الاستفادة من أكبر تجمّعات رأس المال في العالم. وسيتطلب الأمر هندسة مالية لإقناع المستثمرين المؤسّسِيين بالوثوق في الطاقة الشمسية وإئتمانها على رؤوس أموالهم، وقد يتعيّن أيضًا على القطاع العام توفير التوازن لفترة محدودة. لكن، مع ذلك، فقد أخذ رأس المال في التدفق فعلاً، وبدأت الشركات الكبرى تعمل كقنوات لتوجيه رأس المال نحو مشاريع الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم. لذلك، وعلى الرغم من الحاجة الماسة إلى الاستثمار في الطاقة الشمسية على مدى العقود القادمة، والذي قد يصل إلى تريليونات من الدولارات، إلا أن هناك سببًا وجيهًا للتفاؤل بأنّ ابتكار النماذج المالية والتجارية سيرتقي إلى مستوى التحدّي.



الفصل الخامس من الحالة الخيرية إلى الربحية

تقع بلدة باباتي التنزانية على أطراف حديقة تارانجير الوطنية المعروفة بقطعان الأفيال وأشجار الباوباب. مدينة باباتي ذات مناظر خلابة، حيث يبدو جبل كوارا من بعيد بينما تجاورها بحيرة تعجّ بالأسماك (التي تتناثر في كثير من الأحيان عندما يطفو فرس النهر على سطح الماء ليتنفس). هنا في باباتي، تعيش غريس، وهي شابة وأم لثلاثة أطفال مع زوجها باتريك في منزل من غرفة واحدة مبني من الطوب.

تحلم غريس بإرسال أطفالها إلى جامعة دار السلام المرموقة التي تبعد 600 كيلومتر إلى الشرق؛ أملًا في أن يتدرّبوا هناك ليصبحوا أطباء أو مهندسين أو موظفين مدنيين. لكن الحصول على قبول في الجامعة ليس بالأمر الهيّن. لذلك تأخذ غريس أطفالها كلّ مساء إلى سوق المدينة، حيث أضواء أكشاك الباعة المتجوّلين ليحلّوا واجباتهم المدرسية. وعندما يتشتّت تركيزهم وسط فوضى السوق، تعيدهم غريس إلى المنزل، فيجلسون بجوار مصباح الكاز، الذي يملأ الغرفة بالسخام والدخان. تحرص غريس على ادخار 8 دولارات شهريًّا لتتمكّن من شراء مخزون الوقود لإشعال المصباح.

يدرك باتريك في هذا الوقت تقريبًا أنّ بطارية هاتفه الخلوي قد نفدت، وتحتاج إلى شحن، فيتّجه إلى كشك الشحن المشترك في المدينة؛ ذلك أنّ مشروعه الزراعي الصغير يتطلّب أن يظل على اتصال دائم مع البائعين في القرية المجاورة. وإلى جانب التنسيق اللوجستي معهم في الساعات غير المعتادة، فإنّه يتحقق باستمرار من أسعار السوق، وينفّذ معاملاته ومدفوعاته من خلال هاتفه الخلوي؛ لذا يصرف باتريك أكثر من 4 دولارات شهريًّا لإبقاء هاتفه مشحونًا.

في أحد الأيام طرق الباب مندوب مبيعات أرسلته شركة تدعى أوف غريد إليكتريك Grid-Off Electric وهي شركة كهرباء خارج الشبكة للترويج لنظام مدمج يعمل بالطاقة الشمسية، ويمكن أن يشغّل ثلاثة مصابيح توفير طاقة يشحن الهاتف. لم تصدّق غريس إمكانية حدوث ذلك، ولكنّ مندوب المبيعات قدّم عرضًا على الفور بخفض إنفاق الأسرة الشهري على الطاقة من 12 دولارًا إلى 5 دولارات شهريًّا. وعلاوة على استبدال أبخرة الكيروسين الضارّة ورحلات الشحن المتعبة، فإن النظام الشمسي- المكون من لوحة بقوة 12 وات موصولة ببطارية ووحدة تحكم بالشحن، بالإضافة إلى ثلاثة مصابيح توفير طاقة، مكفول الصيانة مع خدمة مجانية طالما ظلت الأسرة تستخدم النظام. وبالتأكيد ستتم المدفوعات عن طريق تحويل المال عبر الهاتف الخلوي، ويوقف تشغيل النظام عن بُعد إذا لم يتمّ السداد في الوقت المحدّد.

تعلّقت غريس وعائلتها بهذه الخدمة بعد مرور ستة أشهر؛ وأخذوا يخططون للترقية إلى خطة 15 دولارًا شهريًّا لزيادة قوة نظامهم الشمسي، وتجهيز غرفة جديدة كانوا يبنونها بمصابيح توفير طاقة إضافية ومذياع وتلفاز. أخذت غريس تتطلع إلى عرض جديد تمامًا لشراء آلة خياطة كهربائية تستطيع من خلالها بدء مشروعها التجاري الصغير في الخياطة. أما شركة أوف غريد إليكتريك فأصبحت مدينة؛ فقد أنفقت ما يقرب من 200 دولار على مكونات النظام الشمسي وتوزيعه وتسويقه، لكنها تتوقّع استرداد كامل المبلغ في غضون ثلاث سنوات أو أقلّ في حال أكملت غريس وعائلتها خطتهم للانتقال إلى فئة خدمة أعلى سعرًا. كما تخدم الشركة العديد من الأسر مثل غريس في منطقة خدمتها الحالية في تنزانيا ورواندا، وكذلك في الأسواق المستهدفة مستقبلًا في الدول الإفريقية جنوب الصحراء الكبرى.

بدأت الشركة عملها في عام 2011م من قبل خريجين من كلية إدارة الأعمال في جامعة أكسفورد، وسرعان ما اجتذبت التمويل من سولارسيتي (التي تُعدّ الآن جزءًا من تسلا) ومستثمري رأس المال الاستثماري. كانت شركة سولارسيتي قد أطلقت سوق الطاقة الشمسية السكنية في الولايات المتحدة، من خلال تقديم أنظمة الطاقة الشمسية المؤجّرة للعملاء الذين يسرّهم الدفع شهريًّا مقابل الطاقة، بدلًا من تحمّل الأعباء المالية العالية كاملة مقدّمًا. وكانت الشركة التنزانية على استعداد لتطبيق الإستراتيجية نفسها في العالم النامي.

جمعت الشركة التنزانية خلال عام 2016م أكثر من 60 مليون دولار أمريكي لتحقيق هدفها المتمثّل في توفير الكهرباء لـ 100- 1000 أسرة في إفريقيا بحلول عام 2019م1. لكن الشركة ليست الوحيدة في الميدان؛ فقد أسهم تدفّق الاستثمارات في السنوات الأخيرة في تمويل الشركات الناشئة في جميع أنحاء إفريقيا وآسيا لتوصيل الكهرباء لأكثر من مليار شخص يفتقرون إليها. يروي هذا الفصل القصة التي تكشف كيف يمكن لنماذج الأعمال المبتكرة توفير الكهرباء خارج نطاق الشبكة للمنازل أو المجتمعات الأكبر كلّها، وكيف يمكن لتقنية الطاقة الشمسية الحالية إزالة واحدة من أصعب العوائق للقضاء على الفقر المدقع في جميع أنحاء العالم.

قد يجادل بعضهم فيما إذا كانت الحلول خارج الشبكة يمكن أن تحسّن الوصول إلى الطاقة بالفعل؛ لأن من الثابت تاريخيًا أن كلّ التقدّم لإيصال الكهرباء لمن يفتقرون إليها قد تحقق تقريبًا من خلال توسيع نطاق شبكات الطاقة المركزية.

ولكن، لكونها منتجًا ثانويًّا في سوق الطاقة الشمسية العالمية سريعة النمو، وأيضًا بسبب التكاليف المنخفضة للألواح الكهروضوئية، صارت أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المستقلة غير المتصلة بالشبكة الرئيسة، قادرة فجأةً على المنافسة من حيث التكلفة مع الكيروسين والديزل والكتل الأحيائية التي يستخدمها حاليّا معظم سكان العالم الأشدّ فقرًا. ومما يساعد في انتعاش الاقتصاد المواتي للأنظمة الشمسية هو انخفاض أسعار الأجهزة المنزلية؛ بدءًا من المصابيح ووصولًا إلى

المراوح وأجهزة التلفاز، التي تتسم بالكفاءة الفائقة في استخدام الطاقة. وفي الوقت ذاته، أدّى ظهور الهواتف الخلوية والخدمات المصرفية عبر الهاتف الخلوي إلى زيادة الرغبة في الحصول على الكهرباء لشحن الهواتف، وتوفير طريقة للعملاء لدفع أثمانها2.

لم تلاحظ مرافق الطاقة الوطنية المتثاقلة هذه التغييرات بشكل سريع، لكن روّاد الأعمال الأذكياء، الذين أدركوا الفرصة، توافدوا على الطاقة الشمسية خارج الشبكة، فصمّموا مجموعة متنوّعة من نماذج الأعمال ليقدّموا لفقراء العالم طعم الكهرباء الأول، ويستغلوا رغبة هؤلاء الفقراء غير المستغلة في دفع ثمنها.

يحدث الجزء الأكبر من هذا النشاط التجاري في الدول الإفريقية جنوب الصحراء الكبرى ودول جنوب آسيا، التي تضمّ 90٪ من سكان العالم الذين لا تصلهم الكهرباء. ولكن هناك تباين صارخ بين تطوّر أسواق الطاقة الشمسية خارج الشبكة في كلّ منطقة من هذه المناطق؛ ففي كينيا وتنزانيا ورواندا في شرق إفريقيا، التي تشكّل مركز الطفرة الشمسية خارج الشبكة، هبّت الشركات إلى القرى النائية من دون القلق بشأن الرقابة الحكومية أو اللوائح التقييدية. لقد كسبت العملاء من خلال الوعد بتقليل تكلفة الكهرباء مع تحسين جودتها، وقد فعلت ذلك وهي تدرك مخاطر العمل في المناطق الخارجة عن القانون حيث لا قيمة للعقود عمليًّا. وبفضل استخدامها الذكي للتقنية، فإن هذه الشركات لا تحتاج إلى إشراف حكومي؛ لأنّ بإمكانها إلغاء تنشيط أنظمة الطاقة الشمسية عن بُعد في حال تأخّر المدفوعات وعدم تسديدها عبر الهاتف الخلوي.

لكن النقيض من ذلك يحدث في الهند، فالمسائل الاقتصادية البحتة ومستوى الأمان ليست العوامل الوحيدة التي يتعيّن على الشركات أخذها في الحسبان؛ لأنّ القرويين الريفيين يتمتعون هناك بالإعانات الحكومية لشراء الكيروسين، ما يجعل سعر هذا الوقود منخفضًا على نحو مصطنع. وحتى وقت قريب، كانت القيود الفيدرالية المفروضة على الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول تعني أنّه يتعيّن على الشركات الهندية تحصيل مدفوعات الكهرباء من العملاء شخصيًّا (وهذه طريقة مكلفة وغير موثوق بها). ونتيجة لذلك كانت النجاحات التي حقّقتها الطاقة الشمسية خارج الشبكة أكثر تواضعًا. أما الآن، وبعد أن خفّفت الحكومة هذه القيود، فقد تحسّنت الآفاق بالنسبة إلى سوق الطاقة الشمسية خارج الشبكة في الهند بالطريقة بالطريقة التي تعمل بها الأسواق الإفريقية.

ازدهرت مجموعة من نماذج الأعمال المبتكرة في ظل سياسة عدم التدخّل في الاقتصاد والبيئات شديدة التنظيم. وتمثّل شركة Grid Electric-Off التنزانية النموذج الأكثر شعبية لتمكين الناس في أسفل الهرم الاقتصادي من تمويل الطاقة الشمسية، وذلك عبر دفع الفاتورة عند الاستحقاق أو الاستخدام (PAYG) Go-You-As-Pay-، فقد موّل المستثمرون الدوليون في عام 2016م الشركات الناشئة بنظام الدفع حسب الاستخدام بما يزيد على 200 مليون دولار.3 وكما هو الوضع بالنسبة إلى الطاقة الشمسية السكنية في الولايات المتحدة (انظر الفصل 4)، فإنّ التوريق قد يكون

المفتاح لفتح تجمّعات ضخمة من رأس المال من الخارج، التي يمكن أن تموّل التكلفة الأولية لمشاريع نظام الدفع عند الاستخدام.

بالإضافة إلى الهندسة المالية الذكية، يقدّم مزوّدو الطاقة الشمسية خارج الشبكة مجموعة متنوّعة من المنتجات التي تمتدّ من أنظمة ذات لوحة شمسية واحدة إلى شبكات مصغّرة تخدم مئات المنازل والشركات؛ حيث إنّ تعدّد استخدامات الألواح الشمسية يعني أنّه يمكن استخدامها في عدد لا يحصى من تكوينات وأحجام النظام المختلفة. وبالإضافة إلى خدمة المجتمعات المعزولة خارج الشبكة، تستطيع الشبكات الشمسية الصغيرة تحسين جودة خدمة الكهرباء للذين لا يمكن الاعتماد على اتصالهم الشبكي بشكل محبط؛ مثل المناطق الحضرية التي تخدمها شبكة مركزية متداعية.

يلعب القطاع العام دورًا مهمًا في تمكين الطاقة الشمسية خارج الشبكة لتحسين الوصول إلى الطاقة. أولًا، يجب أن تحرص الحكومات على عدم إعاقة الأسواق، كما فعلت الحكومة الهندية من خلال دعمها للكيروسين والقيود المفروضة على الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول. ثانيًا، يجب أن تكون الحكومات والمؤسّسات المالية الدولية حريصة على تكييف تدخّلاتها لاختبار نماذج أعمال الطاقة الشمسية خارج الشبكة التي يمكن أن تكون في نهاية المطاف مكتفية ذاتيًّا، بدلًا من الاعتماد على الأموال العامة. ثالثًا، على الحكومات تنسيق الجهود لتوسيع الشبكات المركزية مع نشاط ريادة الأعمال لنشر أنظمة شمسية خارج الشبكة، ما يضمن أن تكون الشبكة مكمّلة للطاقة الشمسية خارج الشبكة، وليست منافسة لها. رابعًا، يجب عليها استخدام المشتريات العامة لخفض تكلفة مكوّنات النظام خارج الشبكة، مثل الأجهزة الموفّرة للطاقة. وأخيرًا، تستطيع الحكومات المساعدة من خلال تطوير قوّة عاملة مدرّبة لدعم قطاع الطاقة الشمسية المزدهر خارج الشبكة.

عندما لا يبشّر الماضي بما هو آتٍ

على الرغم من نموّها الأخير، فإنّ الطاقة الشمسية خارج الشبكة مثيرة للجدل؛ إذ يرى بعض خبراء التنمية أنّ هذا يعدّ إلهاءً؛ حيث يجري تشتيت الموارد والانتباه بعيدًا عن الجهود المتضافرة لتوسيع الشبكة المركزية لأي بلد، وتشجيع الناس على الانتقال إلى المدن حيث تكون شبكات الطاقة ذات جدوى اقتصادية. وقد استحوذت هاتان الإستراتيجيتان معًا على كلّ التقدّم تقريبًا خلال القرن الماضي في توصيل الكهرباء لمن لم تكن لديهم من قبل. ونظرًا إلى أنّ الحلول خارج الشبكة لم تحقّق نجاحًا كبيرًا في تحسين الوصول إلى الطاقة في الماضي كما يؤكدون، فإنّ إستراتيجيات المستقبل يجب أن تتجاهل الطاقة الشمسية خارج الشبكة إلى حدّ كبير.

ويرى النقاد أنّ الحلول خارج الشبكة ستفشل لسببين؛ أولهما، أنّ الطاقة من الشبكة أرخص بكثير من الطاقة من المصادر خارج الشبكة؛ لأنّ الشبكة تستفيد من وفورات حجم الطاقة، في حين أنّ البدائل اللامركزية لا تفعل ذلك.4 ويجادل تود موس Todd Moss من مركز التنمية العالمية

Center for Global Development بقوّة ضد توجيه مساعدات التنمية الأمريكية في إفريقيا نحو مشاريع الطاقة الشمسية خارج الشبكة. ويؤكّد أنه مقابل العدد ذاته من الدولارات (الذي يقدّر بـ 10 مليارات دولار)، يمكن للولايات المتحدة أن تجتذب عدّة أضعاف ذلك من الاستثمار الخاص في محطات الطاقة المركزية التي تعمل بالغاز الطبيعي؛ حيث ستوفّر الكهرباء لـ 90 مليون شخص، في حين أنّ استثماره في الطاقة الشمسية خارج الشبكة سيخدم 20 مليونًا فقط.5 إنّ المسار الصحيح للعمل واضح ولا يحتاج إلى تفسير، وفقًا لموس، وبأن الضجيج بخصوص الطاقة الشمسية خارج الشبكة لا يشتّت الانتباه فحسب، بل إنّه ضار اقتصاديًّا. (تسبّب هذا التحليل في إحداث ضجة، وقد شكك بعضهم في منهجيّته)6.

أما السبب الثاني الذي يجعل العديد من الخبراء يستبعدون الطاقة الشمسية خارج الشبكة فهو فشلها في وضع أفقر سكان العالم على عتبة الوصول إلى الطاقة الحديثة؛ فقد أدّت البرامج المختلفة لتوزيع الفوانيس التي تعمل بالطاقة الشمسية أو مواقد الطهي الشمسية أو الألواح الشمسية على الأسطح إلى تحسين نوعية الحياة بشكل هامشي. لكنّ الخبراء يقولون إنّ هذه الخطوات يمكن أن تكون طريقًا مسدودًا، بدلًا من الطرق التي تسعى لدمج الأشخاص من أسفل الهرم مع الاقتصاد الحديث7. ولكي يصبح الفقراء أعضاء منتجين في هذا الاقتصاد، ويجنوا ثماره، فإنه يلزم أن يتوافق هذا المسعى مع مستوى الاستهلاك السنوي للكهرباء؛ أي بتوفير آلاف عدّة من الكيلوواط/ساعة للفرد الواحد، وهذا يتجاوز بكثير كمّيّة الكهرباء التي يمكن أن تقدّمها أنظمة الطاقة الشمسية البسيطة خارج الشبكة. ويرى مورجان بازيليانMorgan Bazilian من البنك الدولي، أنه بالإضافة إلى الحاجة إلى رفع عدد الأشخاص الذين لديهم كهرباء، فإنّ من الضروري أيضًا زيادة كمّيّة الكهرباء المستخدمة في المنازل والشركات من أجل تعزيز النمو الاقتصادي8.

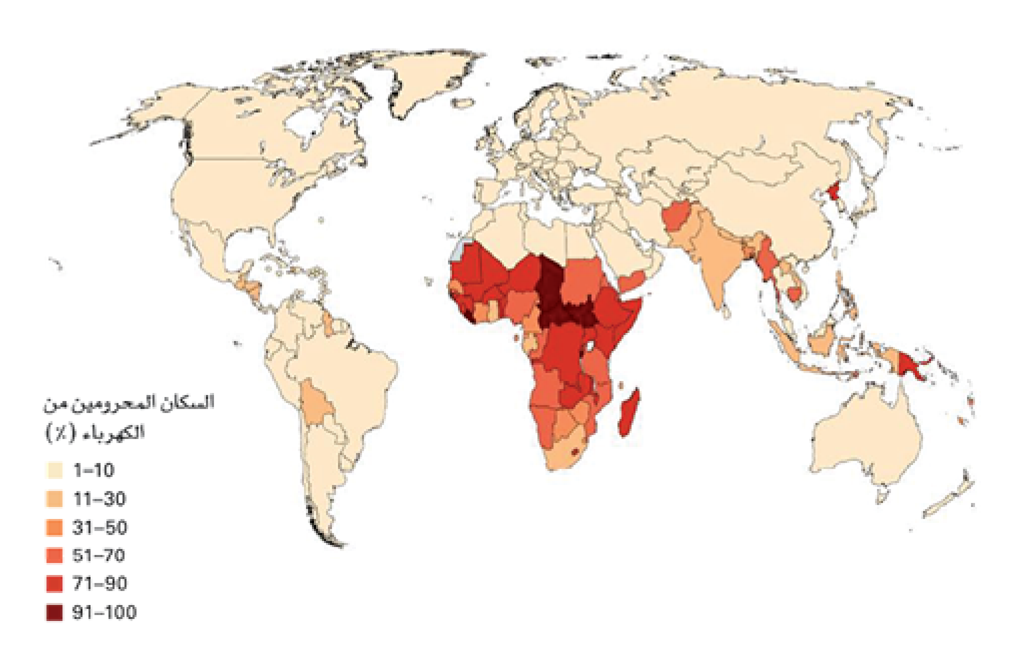
مع أخذ كل ذلك بالحسبان، يجادل تيد نوردهاوس Ted Nordhaus وشايرا ديفي Shaiyra Devi وأليكس ترمباث Alex Trembath من معهد Breakthrough Institute بأنّ "تقنيات الطاقة المتجدّدة غير المتصلة بالشبكة اللامركزية... لا يمكنها أن تحلّ محلّ الطاقة والبنية التحتية الأخرى اللازمة لدعم المشاريع الاقتصادية على النطاق الصناعي. كما لا يعدّ التمويل الأصغر والمشاريع الصغيرة والطاقة الصغيرة بديلًا عن الصناعة والبنية التحتية وشبكة الكهرباء"9.

أنا شخصيًا أحترم حكم هؤلاء الخبراء، فقد أقنعوني بكل تأكيد، من خلال العديد من المحادثات، بأنّ الطاقة الشمسية خارج الشبكة أثّرت بصورة ضئيلة في التقدّم الهائل الذي أُحرز حتى الآن في انتشال الناس من الفقر في العالم الصناعي. لكنّني لست مقتنعًا بأنّ ما حدث في الماضي هو مقدّمة لما يمكن أن يحدث مستقبلًا؛ فالتقاء الاتجاهات المذكورة سابقًا (الخلايا الكهروضوئية الشمسية، والأجهزة، والبطاريات الأرخص؛ وظهور الهواتف المحمولة والخدمات المصرفية؛ وروّاد الأعمال الذين يربطون ذلك كلّه بنماذج الأعمال المبتكرة) قد مكّن جيلًا جديدًا من الحلول خارج الشبكة الأكثر اقتصادًا، ويمكنه تشغيل نطاق أوسع من الاستخدامات مقارنة بالأنظمة السابقة.

آخذة هذه الاتجاهات الحديثة بالحسبان، خلصت إحدى الدراسات إلى أنّ أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة يمكن أن توفّر ربطًا حقيقيًّا بالكهرباء لأكثر من مليار شخص بحلول عام 2030م. وخلُصت الدراسة أيضًا إلى أنّ غالبية المكاسب من الوصول إلى الطاقة ستتحقّق من خلال التوسّع في نطاق الشبكات المركزية. لكن حلول الكهرباء خارج الشبكة والجهود المبذولة لتوسيع الشبكات المركزية يمكنها -بالعمل جنبًا إلى جنب كما أشارت الدراسة- أن توفّر كهرباء موثوقة لثلاثة مليارات شخص بحلول عام 2030م، ما يوازن النمو السكاني لتحقيق وصول شبه عالمي للطاقة[10].

توفّق هذه النظرة بين وجهات النظر المتنافسة التي ترى أنّ الطاقة الشمسية خارج الشبكة عصًا سحرية أو تشتيتًا للانتباه؛ ففي العديد من البلدان التي كافحت فيها الحكومات لبناء بنية تحتية مركزية للشبكات، من المحتمل أن تلعب الطاقة الشمسية خارج الشبكة دورًا مهمًّا، وإن لم يكن حصريًا؛ إذ يمكنها أن توفّر الكهرباء للمناطق النائية جدًّا التي قد لا تصلها الشبكة أبدًا. ويمكنها أيضًا أن توفّر بديلًا مؤقتًا عند التأخير في تمديدات الشبكة، وأن تكمل طاقة الشبكة في المناطق التي بها اتصال شبكي وتشكو من سوء الخدمة، كما هي الحال غالبًا في الضواحي الحضرية. تعترف وجهة النظر هذه أنّه للمساعدة في وضع الدول على طريق الازدهار الاقتصادي، فيجب أن تكون الطاقة الشمسية خارج الشبكة نقطة انطلاق، وليس عائقًا أمام المستويات الحديثة من الوصول إلى الطاقة.

يشير حجم مشكلة الوصول إلى الطاقة إلى أنّ حلّها يتطلّب إستراتيجية شاملة، إذ لا يزال أكثر من مليار شخص حول العالم بدون كهرباء على الإطلاق، والعديد غيرهم يفتقرون إلى الكهرباء التي يمكن الاعتماد عليها. يوضّح الشكل 5.1 أنّ المناطق ذات الوصول المحدود تتركّز في تادول الإفريقية جنوب الصحراء الكبرى، وفي جنوب آسيا. وعلى الرغم من أنّ المشكلة قد تبدو أكثر حدّة في دول أفريقيا الفقيرة، فإنّ الحجم السكاني الهائل في جنوب آسيا يعني أنّه على الرغم من أنّ ثلاثة أرباع الهنود يحصلون على الكهرباء، فإنّ الهند -في الواقع- لا تزال تمثّل المرتبة الأولى من ناحية عدد السكان غير المتصلين بالكهرباء، حيث يصل عددهم إلى 263 مليونًا. وتأتي نيجيريا في المرتبة الثانية (75 مليونًا)، تليها إثيوبيا (67 مليونًا) وبنغلاديش (62 مليونًا)[11].



الشكل (5.1): التوزيع العالمي للسكان المحرومين من الكهرباء.
المصدر: البنك الدولي.

كما أنّ عدد الأشخاص الذين لديهم إمكانية الحصول على الكهرباء في طريقه للزيادة؛ حيث إنّ النمو السكاني في المناطق غير الموصولة يزيد من العدد الإجمالي، لا سيّما في دول جنوب الصحراء الكبرى (باستثناء جنوب إفريقيا)، التي لديها قدرة توليد أقلّ من السويد. وقد يكون من غير الواقعي أن نتوقّع قيام الحكومات بتوسيع الشبكة لزيادة الوصول إلى الطاقة بشكل كبير. مثلًا، يتطلّب الوصول إلى الكهرباء بنسبة 70٪ في دول إفريقيا جنوب الصحراء الكبرى أن تضاعف البلدان الاستثمار السنوي في قطاعات الطاقة لديها من 7.5 مليار دولار إلى 15 مليار دولار على المدى القصير. أما على المدى الطويل، فقد تكون هناك حاجة إلى أكثر من تريليون دولار من الاستثمارات لتلبية متطلبات الطاقة.12 ومن غير المرجح أن تحقّق الحكومات التي تعاني ضائقة مالية مثل هذا العمل الضخم.

لكنّ الخيارات خارج الشبكة التي يموّلها القطاع الخاص بالكامل تقريبًا قد تؤثّر في سدّ الفجوة. وعلى عكس النظرة السائدة، فإنّ الناس في أسفل الهرم لا يعدّون بالضرورة فقراء للغاية لدفع ثمن الطاقة. وفي الواقع، ينفق الذين لا يحصلون على الكهرباء قرابة 27 مليار دولار سنويًّا فقط على الإضاءة وشحن الهاتف المحمول. لكنّ مصادر طاقتهم الحالية لها عيوب واضحة؛ فبالإضافة إلى أنّها باهظة الثمن، فإن الضوء المنبعث من مصابيح الكيروسين أو الشموع رديء ولا يتمتّع بالجودة، ويسبّب تلوّثا قاتلًا للهواء الداخلي. أما شحن الهاتف الجوّال فغالبًا ما يستلزم القيام برحلات شاقة إلى محطة

شحن مشتركة على بعد أميال، والعديد من هؤلاء العملاء قادرون وراغبون في الدفع مقابل الحصول على الكهرباء في المنزل13.

والمثير للدهشة أنهم مستعدّون لدفع الكثير مقابل كلّ وحدة كهرباء أكثر مما يدفعه العملاء في الدول المتقدّمة؛ فقد يرفض الأمريكي أسعار الطاقة التي تزيد على 20 سنتًا/كيلوواط ساعة (يبلغ متوسّط سعر التجزئة للكهرباء في الولايات المتحدة قرابة 12 سنتًا / كيلوواط/ ساعة)، في حين أنّ هذا الرقم لا معنىً له بالنسبة إلى سكان القرى الأفارقة المستعدّين لدفع أكثر من 100 دولار سنويًّا لإضاءة منازلهم ليلًا، و20 سنتًا رسوم لكلّ مكالمة هاتفية. وهذا يترجم إلى 30-50 دولارًا للكيلوواط/ساعة من الكهرباء. ويُعدّ ذلك أكثر من 100 ضعف ما يرغب نظراؤهم في البلدان المتقدّمة في دفعه. لذلك، وعلى الرغم من أنّ الكهرباء خارج نطاق الشبكة أغلى من كهرباء الشبكة، فإنّها لا تزال أقلّ بكثير مما يرغب العملاء في دفعه14.

ومع ذلك، كانت الأنظمة خارج الشبكة، التي غالبًا ما يتم إنشاؤها لحرق الوقود الأحفوري، ذات قوّة جذب محدودة حتى الآن، واقتصرت على الأسواق المتخصّصة. على سبيل المثال، يواصل السكان في الجزر الصغيرة في إندونيسيا والفلبين، حيث لا يعدّ تمديد الشبكة خيارًا قابلًا للتطبيق، استخدام مولدات الديزل المحمولة لتشغيل الشبكات الصغيرة. وقد نشرت دولة مالي الإفريقية أكثر من 200 شبكة صغيرة microgrid معزولة تعمل بالديزل. (يستخدم الكثير في صناعة الطاقة الشمسية مصطلح "microgrid" و"minigrid" بالتبادل، بينما يفترض بعضهم الآخر أنّ الأخير أكبر من السابق. يستخدم هذا الكتاب فقط مصطلح "microgrid" ليعني شبكة معزولة، من أيّ حجم، غير متصلة بالشبكة الرئيسة).

ومع ذلك، بدأت الأنظمة خارج الشبكة تحظى بالجاذبية مؤخّرًا؛ فمع انخفاض تكاليف التقنية، برزت الطاقة الشمسية بوصفها خيارًا قابلًا للتطبيق بشكل متزايد لدعم الديزل أو استبداله. وهذه نقطة دخول جاذبة للطاقة الشمسية التي يمكن أن تعتمد على البنية التحتية الحالية للشبكات الصغيرة التي بُنِيت بالفعل في المناطق النائية.15 بالإضافة إلى وضع الطاقة الشمسية في الشبكات الصغيرة الحالية التي كانت تستخدم الديزل سابقًا، طوّرت الشركات مجموعة من الأنظمة الشمسية للوصول إلى العملاء غير القادرين على الوصول إلى الشبكة أو الكهرباء خارج نطاق الشبكة. وهذه الأنظمة التي تعرف باسم أنظمة "بيكوسولار picosolar"، تتراوح في الحجم من بضع واطات إلى عدّة كيلوواط وأكثرها في شكل شبكات مصغّرة تربط مجتمعات بأكملها معًا. وقد بدأت كلّ هذه المتغيّرات في النمو بسرعة. وتستطيع أنظمة بيكوسولار، التي تقلّ عن 10 واط، أن تشغّل مصباحًا واحدًا أو مصباحين وربما تشحن الهاتف. وقد بِيع منها 44 مليونًا بدءًا من عام 2015م، بعد أن كانت مبيعاتها لا تذكر قبل خمس سنوات.

تزايدت في الآونة الأخيرة أنظمة أكبر وحتى أسرع في توليد الطاقة. قد يصل حجم طاقة أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية Solar home systems (SHSs) إلى 300 واط، وهي تجمع بين الألواح الشمسية والبطارية (عادةً ما تكون بطارية الرصاص-الحمض مثل تلك الموجودة في سيارتك، ولكنّ بطارية ليثيوم-أيون بدأت تحلّ مكانها بشكل متزايد مع انخفاض تكاليف التصنيع)، والأجهزة الإلكترونية والأجهزة المنزلية لتوفير خدمات الطاقة لأسرة واحدة. وبالإضافة إلى الإضاءة وشحن الهاتف، فقد تشمل خدمات الطاقة هذه تشغيل تلفاز أو مروحة سقف أو مذياع أو حتى ثلاجة. وقد أدى ظهور نموذج الأعمال الخاص بالدفع عند الاستخدام إلى تعزيز مبيعات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية في السنوات الخمس الماضية. وبحلول نهاية عام 2015م، كان لدى أكثر من نصف مليون أسرة في جميع أنحاء إفريقيا وآسيا أنظمة طاقة شمسية منزلية16.

شهد نظام خارج نطاق الشبكة نموًّا ملحوظًا في الآونة الأخيرة، وهو يعتمد على الشبكات المصغرة في نطاق يتراوح من عدّة كيلووات إلى عدّة ميغاواط في الحجم لربط العديد من المنازل أو الشركات معًا. وقد تكون هذه الأنظمة هجينة، من حيث إنّها لا تشمل الطاقة الشمسية والبطاريات فحسب، بل تشمل أيضًا توربينات الرياح ومولّدات الديزل ومصادر الطاقة الأخرى.17 وقد بدأت هذه الأنظمة في الانتشار في إفريقيا وآسيا. وانقسم صعود الطاقة الشمسية خارج الشبكة بوجه عام بشكل متساوٍ تقريبًا بين المنطقتين، من حيث سعة الطاقة18.

بدأت الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة في بعض الدول تُحدث تغييرًا حقيقيًّا في مشكلة الوصول إلى الطاقة، ويشير نموّها السريع إلى أنه سيكون لها أثر أكبر في السنوات المقبلة. ولا يوجد مكان يبدو فيه وجود طاقة شمسية خارج نطاق الشبكة واعدًا أكثر وضوحًا مما هو عليه في بنغلاديش التي تُعدّ واحدة من أكثر دول العالم كثافة سكانية. يبلغ عدد سكانها 163 مليون نسمة، يعيش نصفهم من دون كهرباء في عام 2003م. ومنذ ذلك الحين انخفضت نسبة السكان الذين حُرموا الكهرباء إلى 20٪ فقط، وقد جاء قرابة ثلثي هذا التحسّن من الجهود المبذولة لإيصال العملاء بالشبكة المركزية، والثلث المتبقي حدث بفضل الزيادة الهائلة في أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة.19بحلول عام 2014م، مثّل 3 ملايين من أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية في بنغلاديش نصف إجمالي أنظمة الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة في جميع أنحاء العالم20.

من المؤكد أنّ بنجلاديش لم تحلّ تمامًا مشكلة الوصول إلى الطاقة. لقد تطلّب الأمر دعمًا من البنك الدولي وتنسيقًا حكوميًّا لبدء هذا البرنامج الطموح. ولا تزال الأسر التي لديها أنظمة طاقة شمسية منزلية تخضع لقيود على خدمات الطاقة التي تم تجهيز أنظمتها لتوفيرها. ولكن مع انخفاض تكاليف التقنية، يمكن أن تصبح الصناعة خارج نطاق الشبكة مكتفية ذاتيًّا، وستتمكن اللوحة الشمسية نفسها مع زيادة كفاءة الأجهزة في استخدام الطاقة من توفير خدمات طاقة عالية الجودة. لذلك، قد تقدّم حالة بنغلاديش لمحة عن الدور المستقبلي الذي يمكن أن تؤدّيه الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة في تحسين الوصول إلى الطاقة في جميع أنحاء العالم. ومن المؤكد أنّها لا تستطيع تحمّل عبء الكهرباء

وحدها، لكن الماضي قد لا يكون مبشّرًا بالمستقبل، وقد تلعب الحلول خارج نطاق الشبكة دورًا مجديًا في العقود القادمة أكبر مما كانت عليه على مدار القرن الماضي.

نظام الدفع حسب الاستخدام

أخيرًا، أدّى ظهور عروض الدفع عند الشراء أو حسب الاستخدام Go-You-As-Pay لأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية خارج نطاق الشبكة إلى استفادة الذين لم يكونوا مربوطين بالشبكة، ولديهم الرغبة بدفع مبالغ كبيرة مقابل كمّيّة صغيرة من الكهرباء. تشبه معظم النجاحات المبكرة في نظام الدفع حسب الاستخدام في إفريقيا حتى الآن- على الرغم من أنّ آسيا أخذت تلحق بالركب إلى حد ما صعود سوق الطاقة الشمسية السكنية في الولايات المتحدة في عام 2008م، حين ظهرت عقود إيجار الطاقة الشمسية، المقدّمة للعملاء الذين يرغبون بتسديد مدفوعات الطاقة الشمسية بشكل شهري، واستغلت استعداد العملاء لدفع ثمن الطاقة الشمسية من دون تحمّل التكلفة الباهظة لتركيب نظام الكهروضوئية مقدّمًا. ومثلما كان على الشركات الأمريكية إيجاد طرق للاستفادة من الأسواق المالية، فإنه يتعيّن أيضًا على روّاد الأعمال المبدعين الذين يقدّمون برامج الدفع حسب الاستخدام لأنظمة الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة، إيجاد طرق لتوفير رأس المال اللازم لبناء مشاريعهم؛ حتى يتمكّن عملاؤهم من الدفع على أقساط ميسرة. وإذا تمكّنوا من التوسّع بنجاح، فإنّ برامج الدفع حسب الاستخدام لأنظمة الطاقة الشمسية لن توفّر الطاقة لأولئك الذين لم يمتلكوها من قبل فحسب، بل يمكنها أيضًا إطلاق العنان لقوّة الائتمان لتحويلهم إلى مستهلكين عصريين.

تنبع جذور نموذج برامج الدفع عند شراء أو حسب استخدام الطاقة الشمسية خارج الشبكة من قطاع الاتصالات السلكية واللاسلكية في شرق إفريقيا؛ فقد أطلقت سفاريكوم Safaricom (أكبر مشغل لشبكات الهاتف المحمول في كينيا) في عام 2007م خدمة ثورية للدفع عبر الهاتف المحمول تسمّى إم-بيسا PESA-M. وقد استخدمها العملاء بشغف، وصارت منذ ذلك الحين الدعامة الأساسية للاقتصاد، لتحويل النقود عبر الهاتف لكلّ شيء بدءًا من الرواتب إلى ركوب سيارات الأجرة. ثم أدرك اثنان من المديرين التنفيذيين وراء إم-بيسا أنّ بإمكان العملاء الدفع مقابل الكهرباء من خلال المنصّة، فأنشؤوا إم-كوبا KOPA-M في عام 2011م لنشر أنظمة صغيرة للطاقة الشمسية المنزلية وتمويلها21.

قدّرت إم-كوبا أنّ الأسر الكينية خارج نطاق الشبكة كانت تنفق ما يقرب من 300 دولار سنويًّا على الإضاءة التي تعمل بالكيروسين وشحن الهواتف المحمولة، في حين أنّها ستوفّر 750 دولارًا على مدى السنوات الأربع الأولى من دفع 45 سنتًا يوميًّا مقابل أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية.22 أثبت عرض القيمة هذا أنه لا يقاوم. وفي غضون أربع سنوات فقط، تمكّنت إم-كوبا من الوصول إلى أكثر من 300,000، أسرة في كينيا وتنزانيا وأوغندا. ومع ذلك، اختارت إم-كوبا بصفتها اللاعب

الأول في السوق، تقديم أنظمة صغيرة جدًّا (أقلّ من 10 وات) تقدّم خدمات طاقة محدودة بالإضافة إلى الإضاءة الأساسية وشحن الهاتف.

أصبح اللاعبون اللاحقون يقدّمون خدمة أكبر؛ حيث تسوّق شركة موبيسول Mobisol التي تعمل في تنزانيا ورواندا، منتجات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية التي تبلغ قوتها 80-200 واط. وهي تتصدّر السوق من حيث قدرة الطاقة الشمسية المركبة، بعد أن نشرت أكثر من 5 ميجاوات من الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة في شرق إفريقيا بدءًا من عام 2016م.23 وتستطيع أنظمتها تشغيل مجموعة واسعة من الأجهزة، بما في ذلك أجهزة التلفاز وأجهزة المذياع والمكواة والأفران. وعلاوة على ذلك، يستطيع عملاء موبيسول استخدام أنظمة طاقة شمسية أكبر لكسب عيشهم. مثلًا، عن طريق تشغيل ماكينة قصّ الشعر الكهربائية التي بدورها تمكّنهم من الدفع مقابل الطاقة بشكل ثابت. وظهرت مجموعة من مزوّدي الطاقة الشمسية الذين يقدّمون أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، وتوفّر أحجامًا تتراوح بين إم-كوبا وموبيسول من حيث قدرة توليد الطاقة؛ مثل أوف غريد إليكتريك التي انتشرت في شرق إفريقيا. ومع تشبّع المنافسة في الأسواق الأولية، تتوسّع الشركات إلى أماكن جديدة، مثل نيجيريا وإثيوبيا، لخدمة الطلب الهائل غير المستغلّ على الكهرباء هناك.

بالإضافة إلى تقديم أنظمة ذات أحجام مختلفة، تختلف الشركات التي تقدّم خدمة الدفع حسب الاستخدام في مستوى تكاملها الرأسي. فمن ناحية، تصمّم شركة أوف غريد إليكتريك وتوفّر أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية الخاصّة بها، شاملة الأجهزة المنزلية. وتدير كذلك قنوات التوزيع والمبيعات والخدمة الخاصّة بها. ويمكّنها هذا النهج من تعرّف ما يفضّله العملاء، واستجابةً لذلك تقوم بتحديث عروض النظام بشكل سريع. ومن ناحية أخرى، توجد أزوري Azuri، وهي شركة تعتمد نظام الدفع حسب الاستخدام، وتقدّم أنظمة طاقة شمسية منزلية أصغر. أدركت أزوري وجود شبكة كاملة من الموزّعين الذين يقومون بتوصيل السلع الاستهلاكية (مثل الشامبو) إلى المناطق النائية، فقرّرت استخدام تلك الشبكة لتوزيع المكوّنات الخاصّة بأنظمتها الشمسية. وبالمثل، اختارت شركة ناشئة أخرى؛ هي دي-لايت light.d، الاستعانة بمصادر خارجية لتوزيع المنتجات بالكامل، والتركيز على ما تُعدّه الأعمال ذات الهامش الأعلى لتصميم وتشغيل منتجات الإضاءة التي تعمل بالطاقة الشمسية.

على الرغم من اختلاف موفّري خدمات الدفع حسب الاستخدام من حيث عروض منتجاتهم ونطاق أنشطتهم، فإنّهم متحدون في استخدامهم للتقنية لتحصيل المدفوعات وتشغيل أنظمة الطاقة الشمسية عن بُعد (انظر الشكل 5.2 للحصول على نظرة عامة عن نموذج خدمة الدفع حسب الاستخدام)؛ حيث يجري العملاء بوجه عام مدفوعات شهرية عبر منصّات مالية على الهاتف المحمول مثل إم-بيسا. ويستخدم مقدّمو الخدمات شبكات الهاتف المحمول لجمع ثروة من البيانات من أنظمتهم الشمسية عن بُعد، ومراقبة أداء المعدات واكتشاف حاجات الصيانة24. إن القدرة على إغلاق النظام

الشمسي ووقف الخدمة عن بُعد في حال التأخّر في السداد، سيوفّر أيضًا على مقدّمي الخدمة تكلفة تشغيل الشبكة التي تقع بعيدًا عن وكلاء التحصيل من أجل تحصيل المدفوعات بشكل مباشر.



الشكل (5.2): كيف يعمل نموذج الدفع حسب الاستخدام.

لكي يحصل العملاء على خيار سداد مدفوعات شهرية لأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية بإضافة رسوم بسيطة أو الإعفاء من الرسوم، يحتاج مقدّمو الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة إلى زيادة رأس المال لتغطية التكلفة الأولية للأنظمة. وقد ذكرت في الفصل السابق أنّ أرخص طريقة لجمع رأس مال المديونية لتغطية غالبية تكلفة النظام الشمسي السكني في الولايات المتحدة هي تشكيل محفظة من مجموعة من الأصول، وإصدار الأوراق المالية في أسواق السندات العامة. والمنطق ذاته ينطبق على حالة العالم النامي خارج نطاق الشبكة مع بعض التعديلات. فإذا تمكّن مقدّمو الخدمات من زيادة رأس مال الديون لتغطية معظم تكلفة محفظة من خدمات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية خارج نطاق الشبكة، فيمكنهم تحرير الأموال لبناء المزيد من الأنظمة.

لكن يوجد فرق شاسع بين مالك منزل في كاليفورنيا ومزارع رواندي؛ فالأول لديه درجة ائتمان محدّدة جيدًا، ويمتلك أصولًا قيّمة، ويتمتّع بسيادة القانون التي تحمي قدسية عقد الإيجار، بينما على النقيض من ذلك، فإنّ الأخير ليس لديه أصول أو درجة ائتمان، وقد يعيش خارج نطاق القانون. ولذلك لم تحقّق عروض التمويل المصغّرة الحالية سوى نجاح محدود في تقديم الخدمات المالية لمن هم خارج النظام المالي العالمي25 26.

ومع ذلك، فقد اكتشفت الشركات الناشئة كيفية جعل محفظة من عقود الإيجار للأفارقة ذوي الدخل المنخفض تبدو جاذبة للمستثمرين الدوليين ذوي الدخل الثابت؛ فقد أعلنت الشركة البريطانية الناشئة بيبوكس BBOXX في أواخر عام 2015م عن أول توريق في العالم لأصول الطاقة الشمسية

خارج نطاق الشبكة، حيث جمعت نصف مليون دولار بمعدّل فائدة 21٪. ويُعدّ هذا المبلغ بداية متواضعة، لكن التجارب الحديثة أدّت إلى تحسين هذه الشروط. 27 ولم يقتصر دخول معركة التمويل على موفّري الطاقة الشمسية خارج الشبكة فقط؛ فإحدى الشركات الناشئة؛ ليندابل Lendable ومقرّها في كينيا، التي تشرف على إقراض من نظير إلى نظير على غرار نادي الإقراض Lending Club، تنمو بسرعة من خلال تمكينك أنت أو أنا من الاستثمار في ديون المستهلكين غير المضمونة في إفريقيا؛ لتمويل أنظمة الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة.

كيف يمكن لهذه الشركات أن تجعل مثل هذه الاستثمارات جاذبة لعملائها الدوليين؟ كما هي الحال بالنسبة إلى الطاقة الشمسية في البلدان المتقدّمة؛ فالجواب هو البيانات؛ حيث يبني موفّرو الطاقة الشمسية قواعد بيانات ضخمة للمكان الذي يعيش فيه عملاؤهم، وما إذا كانوا يدفعون في الوقت المحدّد. وتحتفظ شركات الاتصالات في الوقت نفسه بتقارير طويلة تتتبّع عدد المرات التي يدفع فيها العملاء فواتير هواتفهم المحمولة وفق الوقت المحدّد، حيث يمكن تجميع هذه البيانات كلّها غالبًا من خلال الشراكات بين المموّلين ومقدّمي الطاقة الشمسية وشركات الاتصالات. ويمكن من خلال ذلك إصدار تنبّؤات عالية الدقّة حول ما إذا كان العميل خارج نطاق الشبكة سيدفع بشكل دائم مدفوعات الإيجار لأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية. وباستخدام هذه الدرجات الائتمانية المستنبطة، قد يحقّق مصدّرو الأوراق المالية للطاقة الشمسية خارج الشبكة تصنيفات عالية وأسعار فائدة منخفضة يومًا ما، ما يجذب المزيد من رأس المال إلى القطاع.

إذا نجحت إستراتيجيات التمويل الجديدة هذه، فيمكنها تمويل نشر واسع لأنظمة خارج نطاق الشبكة، التي يمكن أن تطلق بدورها فرصًا اقتصادية تتجاوز الطاقة الشمسية. يقدّم معظم مقدّمي الخدمة للعملاء خيار الدفع حسب الاستخدام الذي يدفعون بموجبه مقابل أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية على مدى فترة زمنية (غالبًا قرابة ثلاث سنوات) ثم يمتلكونها لاحقًا. يمثّل نهج الدفع هذا تحوّلًا كبيرًا في طبيعة نفقات الطاقة المنزلية خارج الشبكة. بينما كانت الأسر في الماضي تنفق الأموال بشكل أساسي عن طريق شراء عبوّات الكيروسين التي تُستخدَم بسرعة، أما الآن فتعود كلّ دفعة شهرية من مدفوعات الطاقة نحو ملكية أحد الأصول القيمة.

بمجرّد أن يمتلك العملاء أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، يمكنهم بعد ذلك استخدامها بوصفها ضمانًا لزيادة الائتمان. وعلاوة على ذلك، فإن سجل الدفع الخاص بهم ودرجة الائتمان المستنبطة قد تجعل اقتراض الأموال في المستقبل أرخص. وإدراكًا منهم بأنّ العملاء الجيدين يمكن أن يمثّلوا مصدرًا لمزيد من الأعمال، فإن العديد من مزوّدي الطاقة الشمسية لديهم طموحات تتجاوز أكثر بكثير من مجرد تقديم خدمات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية الأساسية؛ فقد يقدّمون أنظمة طاقة شمسية منزلية محسّنة مع أجهزة أفضل يستطيع العميل شراءها بالائتمان. ويمكن أن يبيعوا مستقبلًا منتجات أخرى غير متعلقة بالطاقة أيضًا؛ فهم يتصوّرون في نهاية المطاف أنّ العميل يرتقي تدريجيًّا إلى خدمات طاقة ذات جودة أعلى وقوة شرائية أكبر. يمكن أن يُعتمد هذا العرض جزئيًّا للعملاء مثل جريس

وباتريك الذين يستخدمون الكهرباء لتجويد سبل عيشهم وتحسين دخلهم. ولكنه يَعتمد أيضًا على الإمكانات الهائلة لتوفير الائتمان للعملاء الذين لم يتمكنوا من الوصول إليه تقليديًّا.

ومع ذلك، وعلى الرغم من كلّ ما وعد به نموذج الدفع حسب الاستخدام، فلا تزال هناك عقبات هائلة التي من بينها وأهمّها الوصول المحدود إلى التمويل. فعلى الرغم من أنّ بعض مقدّمي الخدمات بدؤوا في الاستفادة من التوريق، إلا أن بوّابات رأس المال الدولي للديون لم تفتح بعد، إذ يحتاج مقدّمو الخدمات من أجل ضمان تمكين التدفّق المستمر للأموال إلى نشر أنظمة الطاقة الشمسية خارج نطاق الشبكة في المقام الأول قبل تسويقها على المستثمرين. ويتطلب ذلك رأس المال العامل الذي يموّل إنشاء مشاريع الطاقة الشمسية وعمليات الأعمال التجارية في أثناء انتظار تلقّي الأموال من العملاء. برزت ندرة رأس المال العامل كعقبة رئيسة تعوق نمو قطاع الطاقة الشمسية خارج الشبكة، وقد تدخّل البنك الدولي لتقديم ديون قليلة الفائدة لتمويل بعض حاجات رأس المال العامل للشركات، وهي بداية جيدة. 28

وظهر تطوّر آخر واعد تمثّل في تخفيف القيود الحكومية في الهند على الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول، وهي القيود التي أعاقت البلاد حتى مع انطلاق نموذج الدفع حسب الاستخدام في إفريقيا. أخيرًا، بدأ بنك الاحتياطي الهندي في أواخر عام 2015م إصدار تراخيص مصرفية لمشغلي الاتصالات، ما مكّن من تقديم خدمات الدفع عبر الهاتف المحمول.29 فمع انعدام الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول، لم يبادر إلا عدد قليل من الشركات بتجربة نموذج الأعمال للدفع حسب الاستخدام في الهند. ومن إحدى الشركات القليلة التي فعلت ذلك، شركة سيبما نتوركس Simpa Networks التي كان عليها الاعتماد على شبكة من البائعين والأكشاك لبيع بطاقات الشحن للعملاء المشتركين في خدمة أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية.30 وإذا مضت الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول قدُمًا، فستتمكن الشركات من تقليص الشبكات باهظة الثمن من وكلاء التحصيل، ما يجعل من الممكن تقديم حزم نماذج الدفع حسب الاستخدام ميسورة التكلفة مع خيارات دفع مريحة.

شبكات ذكية صغيرة ذات فاعلية كبيرة

بقدر ما كان مفرحًا أن نشاهد أثر برامج الدفع حسب الاستخدام في الزيادة المفاجئة في نشر أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، فإنّ الأنظمة التي توفّر الطاقة لأسرة واحدة فقط محدودة بطبيعتها؛ لأنّها باهظة الثمن (على الرغم من أنّها قد تبدو معقولة مقارنة بالتكلفة الباهظة للكيروسين)، بسبب افتقارها إلى وفورات الحجم. وعلى الرغم من قيام الشركات بزيادة إنتاج الطاقة من عروض أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية الخاصّة بها، وإقران الطاقة الشمسية بمجموعة متزايدة من الأجهزة منخفضة الطاقة، فإنّ خدمات الطاقة التي يمكن أن تقدّمها هذه الأنظمة للعملاء محدودة. لذلك، وعلى

الرغم من أنّه قد يكون لها دور مهم في إيصال الطاقة إلى أفقر الفقراء، فإنّ هذه الشركات لا تستطيع حتى الآن تقديم كافة المزايا للوصول إلى الطاقة الحديثة.

لكن القصة مختلفة بالنسبة إلى الشبكات الصغيرة التي تعمل بالطاقة الشمسية، فنظرًا إلى أنّ هذه الأنظمة يمكن ربط بعضها ببعض لخدمة مجتمع بأكمله، فيمكنها تشغيل مجموعة أوسع بكثير من خدمات الطاقة مقارنةً بخدمات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، فضلًا عن أنها تنتج طاقة أرخص نسبيًّا بسبب وفورات الحجم. ومثلما استخدمت الشركات الناشئة عروض الدفع حسب الاستخدام لتحفيز سوق أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، تُروّج الشركات أيضًا طرقًا جديدة لتمويل مشاريع الطاقة الشمسية الأكثر تعقيدًا. وتؤدّي نماذج الأعمال المبتكرة الخاصّة بها إلى زيادة في الشبكات صغيرة. ويمكن للتوضيح استخدام نموذج الدفع حسب الاستخدام - وقد استُخدِم فعلًا - لجعل طاقة الشبكة الصغرى في متناول العملاء. ولكن هناك حاجة إلى مزيد من الابتكارات لتمويل الشبكات الصغيرة التي هي أكبر وأكثر تعقيدًا من شبكات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية. ويمكن أن توفّر مثل هذه الشبكات الصغيرة وصولًا حديثًا للطاقة إلى المناطق التي يكون فيها توسيع الشبكة باهظ التكلفة، وقد استُخدِمت بالفعل لكهربة القرى في جبال الهيمالايا. 31

يمكن دمج الشبكات الصغيرة في المناطق النائية في المستقبل مع الشبكة الرئيسة عند وصولها، وهي في حقيقة الأمر ليست واعدة للمناطق خارج الشبكة فحسب؛ بل يمكنها أيضًا تعزيز موثوقية الطاقة في المناطق التي تصلها خدمات الشبكة المركزية، ولكنها تعاني انقطاعًا متكرّرًا للتيّار الكهربائي. أما تعدّد استخداماتها فيشير إلى أنّ الشبكات الصغيرة هي استثمار مثالي لوضع أولئك الذين لديهم وصول محدود للطاقة على سلّم المستوى المعيشي الحديث.

تتكوّن الشبكات الصغيرة من ثلاثة أنظمة فرعية. الأول، هو النظام الفرعي لتوليد الطاقة، وتبلغ سعته دون 15 ميغاواط أو أقلّ، وفي بعض الحالات لا تصل سوى بضعة مئات من الواط. بالإضافة إلى الألواح الشمسية، قد تستخدم الشبكة الصغرى التي تعمل بالطاقة الشمسية توربينات رياح صغيرة ومولّدات ديزل وبطاريات لتكملة توليد الطاقة الشمسية وتيسيرها.32 أما النظام الثاني، فهو نظام توزيع فرعي يوفّر الكهرباء من المولدات إلى مستخدمي الشبكة الصغرى. ويتكوّن ثالث نظام فرعي من المعدّات والأجهزة التي يستطيع العملاء من خلالها الوصول إلى كهرباء الشبكة الصغرى واستهلاكها - في تشغيل مروحة السقف، على سبيل المثال، بالإضافة إلى عداد كهربائي يقيس مقدار الطاقة التي يستخدمها المنزل.

تكفي هذه الأنظمة الفرعية الثلاثة لتعريف الشبكة الصغرى في المناطق الريفية في العالم النامي، حيث تهدف الشبكات الصغيرة في المقام الأول إلى زيادة الوصول إلى الطاقة. لكن الشبكات الصغيرة تكتسب أيضًا شعبية في العالم المتقدّم لسبب مختلف تمامًا: يمكنها تعزيز ثبات ومرونة إمدادات الكهرباء من خلال الاستمرار في العمل حتى إذا كانت هناك مشكلة في الشبكة الرئيسة.

وفي هذا السياق يحتوي تعريف الشبكة المصغّرة على قيمة مضافة؛ فوفقًا لوزارة الطاقة الأمريكية، تُعرَّف الشبكة الصغرى على أنّها "مجموعة شبه مستقلة من الأحمال المترابطة (المعدّات التي تستخدم الكهرباء) ومصادر الطاقة الموزّعة ضمن حدود كهربائية محدّدة بوضوح تعمل بوصفها كيانًا واحدًا يمكن التحكّم فيها فيما يتعلق بالشبكة."33

حتى عند عزلها عن الشبكة الرئيسة، تكون الشبكات الصغيرة أكثر تعقيدًا وتكلفة من شبكات أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، ويجب على الشركات الناشئة العاملة في العالم النامي. وفي ضوء هذا التعقيد، يتعين على الشركات الناشئة ابتكار نماذج أعمال مبتكرة لنشر الشبكات الشمسية الصغيرة؛ حيث يستخدم العديد من مزوّدي الخدمة نموذج الدفع حسب الاستخدام، معتمدين على مدفوعات الهاتف المحمول الشهرية. فبمجرد تشغيل النظام، كما يقولون، يجب أن تكون مدفوعات كلّ عميل أقلّ بكثير مقابل الطاقة من شبكة صغيرة مقارنةً بأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية بسبب وفورات الحجم.34 لكن على مزوّدي الشبكة الصغرى أولًا أن يموّلوا تكلفة رأس المال العالي؛ من أجل إنشاء مصادر التوليد والبنية التحتية للتوزيع ومعدات العملاء. ويعتمد بقاؤها على تحصيل المدفوعات بشكل ثابت من معظم عملاء الشبكة الصغرى أو جميعهم. وقد يؤدّي فشل محاصيل قرية بأكملها في مجتمع ريفي ما إلى عدم القدرة على الدفع في الوقت المحدّد، ما قد يؤثّر بشكل كبير في وضع الشبكة الصغرى اقتصاديًّا.

لذلك، يجب أن تكمل العناصر المبتكرة الأخرى نموذج الأعمال للدفع حسب الاستخدام. ويُعدّ السعي لضمان وجود "العميل المرساة anchor client" خيارًا شائعًا، وسيوفّر مدفوعات موثوقة لتقليل مخاطر التدفق النقدي للشبكة الصغرى. في الهند، تبني شركة أو إم سي باور OMC Power (وهي رائدة في نشر هذا النموذج) الشبكات الصغيرة بالقرب من أبراج الهاتف الخلوي البعيدة التي تعتمد عادةً على مولّدات ديزل باهظة الثمن. لذا فإنّ أصحابها يرحبون بالتحوّل إلى خيار أرخص. ونظرًا إلى توسّع انتشار الهواتف المحمولة في الهند، فإنّ شركات الاتصالات المشغّلة للأبراج تُعدّ في العادةً آمنة بشكل موثوق، وعميلًا يدفع مقابل استهلاك الطاقة بشكل دائم. وعليه؛ يمكن أن تُعدّ "عميل مرساة"، فإذا كان هذا العميل يوفّر غالبية الإيرادات التي تحتاجها الشبكة الصغرى، فيمكن بيع سعة طاقة الشبكة الصغرى المتبقية وغير المستخدمة إلى مجتمعات القريبة باستخدام نموذج الدفع حسب الاستخدام.35

أظهر بعض الباحثين أنّ إضافة عميل تجاري آخر، مثل مطحنة الدقيق، يمكن أن يقلّل من خطر خسارة مزوّد الشبكة الصغيرة للمال بشكل كبير.36 ويمكن لهذه الإستراتيجية الخاصّة بتنويع مصادر الإيرادات أن تمكّن الشركات الناشئة من تقليل المخاطر التي يراها المستثمرون في تمويل التكلفة الأولية المرتفعة نسبيًّا للشبكات الصغيرة، مقارنة بمشاريع أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية.

وبالإضافة إلى اختيار عملاء الشبكة الصغرى بعناية، على الشركات اتخاذ خيار مهمّ بين استخدام التيار المتردّد (AC) أو التيّار المستمر أو المباشر (DC)؛ حيث يتوافق الأول من ناحية مع معيار الشبكة الرئيسة، ما يجعل من الممكن في النهاية ربط الشبكات الصغيرة والشبكات الكبيرة. لكنّ هذا الأخير أكثر كفاءة وأرخص ثمنًا، وقد يكون مثاليًّا لتكملة شبكة رئيسة غير موثوقة.

إنّ الجدل الخاص بالتيّار المتردّد مقابل التيّار المستمر ليس بجديد، إذ يعود تاريخه في الواقع إلى أكثر من قرن من الزمان، عند ظهور نظام الطاقة والجدل العاصف بين توماس إديسون ونيكولا تيسلا، وهما من الروّاد في صناعة الكهرباء. يومها، دعم إديسون التيار المستمر، وهو تيار ثابت للكهرباء مشابه لتيار مستمر من الماء. وفي الواقع أن إديسون صعق حيوانات المزرعة بالكهرباء علنًا؛ لإثبات أنّ طاقة التيار المتردّد عالية الجهد كانت قاتلة، لكن تسلا، الذي فضّل التيار المتردّد، الذي يتضمّن اتجاه تبديل التيار الكهربائي عدة مرات في الثانية، فاز في النهاية بهذا النقاش.

كانت حجج تسلا منطقية في القرن العشرين. في ذلك الوقت، كان من الممكن إرسال كهرباء التيار المتردّد عبر مسافات طويلة من دون تكبّد خسائر كبيرة على طول الطريق باستخدام تيار متردّد عالي الجهد. وكان من السهل مع تقنية القرن العشرين زيادة جهد طاقة التيار المتردّد الخارجة من المولد، وإرسالها على طول خط نقل عالي الجهد، وتقليل الجهد إلى مستوىً آمن على الجانب الآخر لتوزيعه على العملاء. على النقيض من ذلك، لا يمكن تغيير الجهد الكهربائي للتيار المستمر بسهولة؛ لذلك لا يمكن أن تنتقل طاقة التيار المستمر بعيدًا؛ وعليه، فإنّ الشبكات حول العالم لا تزال تستخدم طاقة التيار المتردّد.

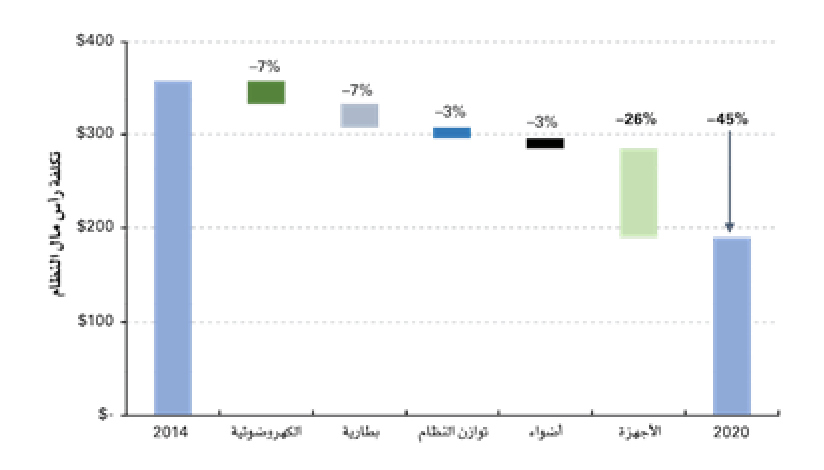
يوفر التوافق مع هذا المعيار سببًا لاستخدام التيار المتردّد في نظام الشبكة الصغيرة؛ فإذا وصلت الشبكة المركزية في وقت ما إلى منطقة تخدمها شبكة صغيرة تستخدم التيار المتردّد، فيمكن لهذه الشبكة الصغيرة ببساطة أن تنضمّ إلى الشبكة الرئيسة بدلًا من محاولة التنافس معها. وقد تبنّت العديد من الشركات الناشئة ذات الشبكات الصغيرة نموذج التيار المتردّد هذا، ومن بينها شركة باورهايف Powerhive في كينيا؛ حيث الحكومات غالبًا ما تكون داعمة؛ لأنها يمكن أن تتشارك مع مثل هذه الشركات الناشئة لإيصال التيّار الكهربائي إلى المناطق النائية باستخدام شبكات صغيرة إلى حين وصول الشبكة الرئيسة في النهاية. وقد منحت الجهات التنظيمية في كينيا باورهايف أول ترخيص في البلاد لبيع الطاقة في مناطق ريفية محدّدة37.

لكن التيار المتردّد صار أقل مواءمة من التيار المستمر في القرن الحادي والعشرين؛ فبفضل التقدّم في تقنية إلكترونيات الطاقة، انخفضت تكلفة تغيير الجهد الكهربائي للتيار المستمر. ولذلك يمكن إرسال التيار المستمر إلى مسافات طويلة مع خسائر منخفضة. يضاف إلى ذلك أنه سيزداد في المستقبل استخدام العملاء للكهرباء التي تعمل بالتيار المستمر لتشغيل أشياء مثل الأضواء الحديثة والأجهزة الرقمية والمركبات الكهربائيةّ لأن تلبية هذه الحاجات عن طريق تحويل التيار المتردّد إلى

كهرباء تيار مستمر غير فعّال. ومع ذلك، فإنّ مرافق الطاقة كيانات عملاقة تشرف على شبكات هائلة من البنية التحتية باهظة الثمن؛ لهذا من غير المحتمل أن تتحوّل الشبكات المركزية إلى التيار المستمر في أي وقت قريب.

يختلف الأمر بالنسبة إلى الشركات التي تبني شبكات صغيرة اليوم، وذلك لأسباب عدّة. أولًا، لا تحتاج الشبكات الصغيرة عادةً إلى توصيل الكهرباء لمسافات طويلة، وتعمل المسافة القصيرة على تحييد الميزة الرئيسة للتيار المتردّد على التيار المستمر (التي لم تعد ميزة حتى الآن). ثانيًا، تعدّ الشبكات الصغيرة التي تعمل بالطاقة الشمسية على وجه الخصوص أكثر ملاءمة للتيار المستمر من التيار المتردّد؛ لأنّ الطاقة الشمسية تنتج طاقة التيار المستمر، والبطاريات تخزّن طاقة التيار المستمر وتفرّغها. ثالثًا، الأجهزة الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة، كمصابيح توفير الطاقة وأجهزة التلفاز والمذياع والمراوح مثلًا، كلها تستخدم طاقة التيار المستمر. ويتطلب تشغيل الأجهزة الخاصّة بالعميل وجود شبكة صغيرة تولد الطاقة من أشعّة الشمس، بحيث تعمل على التيار المتردّد. وليتحقّق ذلك يجب الحصول على معدّات تُحوّل الطاقة الشمسية أو طاقة البطارية من التيار المستمر إلى التيار المتردّد، ثم العودة من التيار المتردّد إلى التيار المستمر، حيث غالبًا ما يُفقد جزء من الكهرباء في هذه التحويلات المتكررة، ما بين 5 بالمئة إلى 20 بالمئة.38 وعلى النقيض من ذلك، يمكن أن تكون الشبكة الصغيرة التي تعمل بالتيار المستمر أكثر كفاءة.39

هذه العوامل كلّها يمكن أن تجعل تكلفة الشبكات الشمسية الصغيرة ذات التيار المستمر أقلّ من نصف تكلفة نظيراتها من التيار المتردّد. لكنّ التحسينات الأكثر دراماتيكية من حيث الجدوى الاقتصادية للأول جاءت من انخفاض التكاليف والأداء المرتفع لأجهزة التيار المستمر عالية الكفاءة. فقد انخفضت تكلفة مصابيح توفير الطاقة إلى أكثر من عشرة أضعاف بين عامي 2009م إلى عام 2015م، وتضاعف خلال الفترة نفسها مقدار الضوء المنبعث من هذه المصابيح إلى أكثر من الضعف.40 وبهذه الوتيرة سوف يستمر تحسّن أداء هذه المصابيح. يتتبع الشكل (5.3) انخفاض تكاليف الأجهزة في أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، ولكن هذا الاتجاه ينطبق بشكل متساوٍ على الشبكات الشمسية الصغيرة. وكان من المتوقّع أن تنخفض تكلفة أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية إلى النصف تقريبًا بين عامي 2014م و2020م، وسيأتي معظم هذا التحسّن من أجهزة أرخص وأكثر كفاءة.



الشكل (5.3): التكلفة الحالية والمتوقّعة لأنظمة الطاقة الشمسية المنزلية، مقارنة بالتكلفة الإجمالية لرأس مال أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية خارج الشبكة التي تعمل بلوحة 25 وات الكهروضوئية في 2014م مع نظام مكافئ في عام 2020م، ما أدّى إلى تحقيق وفورات في التكلفة حسب مكوّن النظام.
المصدر: Bloomberg New Energy Finance (2016).

أجرى باحثون في الهند عمليات محاكاة حاسوبية لمقارنة تكاليف استخدام شبكات صغيرة عاملة بالطاقة الشمسية وبالتيار المتردّد والتيار المستمر لتشغيل استخدام الطاقة المنزلية، فوجدوا أنّ الشبكة الصغيرة للتيار المستمر تتطلّب كهرباء أقلّ بثلاث مرات تقريبًا، وتشكّل أقلّ من نصف التكلفة، مقارنةً بمنزل فيه أجهزة أقلّ كفاءة متصلة بشبكة ميكروية للتيار المتردّد عانت من فاقد التحويل41.

يجادل المدافعون عن التيار المتردّد بأنّ مزايا التيار المستمر هذه تتفوّق عليها قدرة شبكات التيار المتردّد المصغّرة على الارتباط بالشبكة الرئيسة، وهو أمر بالغ الأهمية لتوفير الوصول إلى الطاقة الحديثة في النهاية. لكنّ اتصال الشبكة لا يضمن بأيّ حال الوصول إلى الطاقة الحديثة. وإذا ما علمنا أنه بالإضافة إلى 1.1 مليار شخص في جميع أنحاء العالم لا يحصلون على الكهرباء، يوجد ما يصل إلى مليار شخص آخر لديهم اتصال بالشبكة ولكنهم يواجهون خدمة غير موثوقة بشكل محبط42. ويمكن أن يكون الوصول المستمر إلى الطاقة مهمًّا بقدر أهمّية امتلاك أي نوع من الطاقة على الإطلاق؛ فقد وجدت إحدى الدراسات أنّ زيادة الرضا عن تلقّي سبع ساعات إضافية من الوصول للكهرباء في اليوم، كانت مماثلة لتلك الناتجة عن الحصول على توصيل الكهرباء في المقام الأول43. وفي الواقع، وجد الباحثون في ريف كارناتاكا/جنوب الهند، أنه في العديد من المناطق الريفية التي وصلت الشبكة إليها مؤخّرًا، لا يزال السكان المحليون يفضّلون المولدات خارج الشبكة؛ لأنّ طاقة الشبكة كانت غير موثوقة44. والمدن التي تعدّ موطنًا بالفعل لغالبية سكان العالم، ستواجه بشكل متزايد تحدّيات الوصول إلى الطاقة بشكل أكثر إلحاحًا. ومن المتوقع أن تواجه شبكات

الكهرباء القديمة غير القادرة على استيعاب النمو السكاني انقطاع التيار الكهربائي المزمن في المناطق الحضرية وضواحيها وفي المناطق شبه الحضرية.

يمكن أن تحسّن شبكات التيار المستمرّ الصغيرة من هذا الوضع المقلق. وفي الواقع قدم فريق من الباحثين من المعهد الهندي للتقنية إلى ولاية بيهار التي تعدّ من الأكثر الولايات كثافة سكانية في الهند، حيث إنّها تضمّ أكثر من 100 مليون شخص. ونشر الفريق شبكات صغيرة تعمل بالتيار المستمر لتحسين الوصول إلى الطاقة في المناطق الحضرية. كان هدفهم تزويد 100000 منزل بشبكة صغيرة تعمل بالتيار المستمر يتم توليدها عبر لوحة شمسية وبطارية، كما تُوصَل بالشبكة من خلال جهاز يحوّل طاقة شبكة التيار المتردّد الواردة إلى كهرباء تيار مستمر.

عندما تعجز الشبكة عن تلبية طلب العملاء، وهذا ما يحدث غالبًا في ولاية بيهار لأنّها تعاني أكبر عجز بين العرض والطلب على الطاقة، ويؤدّي انقطاع التيار الكهربائي إلى قطع ما يصل إلى 90 بالمئة من طاقة الشبكة، فيتوقّع الباحثون أن تكون نسبة الـ 10 بالمئة المتبقية -إلى جانب الطاقة من الألواح الشمسية والبطارية- كافية لتشغيل مجموعة كاملة من أجهزة التيار المستمر: مثل خمسة مراوح، وثمانية مصابيح، وجهازي تلفاز صغير، والعديد من شواحن الهواتف المحمولة والأجهزة اللوحية، وشاحن الحاسوب المحمول. وستتمتّع هذه المنازل بفضل شبكات التيار المستمر الصغيرة بوصول مستمر إلى مجموعة من خدمات الطاقة الحديثة، على الرغم من أنّ 10 بالمئة فقط من شبكة الكهرباء قد تكون متاحة في أي وقت. وعلى الرغم من أنّ كلّ أسرة تحصل على شبكة صغيرة خاصّة بالتيار الكهربائي المباشر في هذا النشر المحدّد، فإنّ الباحثين بربطون الأسر معًا في مشروع آخر في ولاية راجاستان، ما يجعل من الممكن إعادة تخصيص الموارد المحدودة بشكل أكثر كفاءة لتلبية الطلب45.

يمكن أن تؤدّي عملية تشكيل الشبكات الصغيرة للتيار المستمر في الواقع إلى نموذج جديد تمامًا في كيفية بناء أنظمة الطاقة، ما يؤدّي إلى قلب النموذج التقليدي رأسًا على عقب؛ حيث تستخدم المرافق في هذا النموذج عملية تخطيط من أعلى إلى أسفل، والتنبؤ بالطلب وبناء شبكة من خطوط الطاقة والمعدات لتلبية تلك الحاجات. ولكن في مستقبل شبكات التيار المستمر الصغيرة، قد تنشأ الشبكات بشكل طبيعي؛ من الأسفل إلى الأعلى46 47.

تُعرف هذه النظرية باسم "كهربة السرب swarm electrification". ويشبه الباحث الذي ابتكر المصطلح (سيباستيان جْروه Sebastian Groh) شبكة الكهرباء من أسفل إلى أعلى بـ "سرب من الأسماك swarm of fish"؛ حيث "لا يوجد ذكاء مركزي، وتعمل الأسماك معًا لخلق الوحدة ". تعمل شركته؛ مي سولشير ME SOLshare، على تمكين 4 ملايين أسرة في بنغلاديش من الذين يمتلكون أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية للتيار المستمر من الاتصال بعضها ببعض وتبادل الكهرباء. وباستخدام مدفوعات الهاتف المحمول من نظير إلى نظير التي تُسجَّل بأمان باستخدام تقنية سلسلة

الكتل، blockchain technology، التي تُستخدم أيضًا لمصادقة معاملات البيتكوين، تستطيع المنازل المشاركة في سوق من أسفل إلى أعلى، وتحقيق التوازن الديناميكي بين العرض والطلب عبر شبكة تيار مستمرّ صغيرة مجمعة ذاتيًّا. تُعدّ بنغلاديش نقطة انطلاق مثالية، حيث يبلغ عدد سكانها 160 مليون نسمة في منطقة بمساحة ولاية نيويورك، ما يعني أنّ من الممكن تطبيق مثل هذا المفهوم في أيّ مكان فيه كثافة سكانية عالية48.

من الواضح أنّ الشبكات الصغيرة للتيار المستمر يمكن أن توفّر فرصًا لا حصر لها من الطرق الجديدة لتحسين الوصول إلى الطاقة، وإذا تمكّنت الشركات المبتكرة من توسيع نطاق عروضها بنجاح، فقد يضحك إديسون أخيرًا في جدل التيار المتردّد مقابل المستمر في نهاية الأمر.

التدخّلات الحكومية، سيف ذو حدين

يحاول عدد كبير من نماذج الابتكار والأعمال المتعلقة بخارج الشبكة -سواء كانت ظهور تأجير أنظمة الطاقة الشمسية المنتهي بالتمليك في إفريقيا أم كهربة السرب في بنغلاديش- تجنّب الاعتماد على القطاع العام. ويعود سبب ذلك إلى أنّ الحكومات الضعيفة وشركات الطاقة التي تعاني من الأعطال والمملوكة للدولة هي المسؤولة جزئيًّا عن التقدّم البطيء للكهرباء. لذا فإنّ من الأفضل عدم الاعتماد على الحكومة إطلاقًا؛ حيث يفكّر روّاد الأعمال ويركزون على تقديم منتج ذي قيمة للعملاء الذين لا يحتاجون إلى مساعدة عامة. وقد عملت هذه الإستراتيجية حتى الآن بشكل أفضل كلما كان هناك حدّ أدنى من التنظيم الحكومي. وعليه، تمكّنت الشركات الناشئة في أفريقيا من التوسّع بسرعة على خلفية أنظمة الدفع بوساطة الهاتف المحمول، ولكنّ القيود الحكومية على الخدمات المصرفية عبر الهاتف المحمول في الهند حالت،كما لوحظ سابقًا، دون نمو مماثل في السوق.

لذلك، فإنّ أولية العمل هي تفعيل دور القطاع الخاص في الابتكار، وهذا يتطلب إلغاء بعض السياسات التي تحدّ من الابتكار، ومن أهمّها دعم الكيروسين في الهند، الذي يقلّل بشكل مصطنع من سعر الكيروسين، ويزيد من صعوبة منافسة الطاقة الشمسية خارج الشبكة. ونتيجة لهذه السياسة، يجري عن طريق الإعانات في الهند إلغاء أكثر من 70 بالمئة من المدخرات التي يحققها العملاء من التحوّل من الكيروسين إلى الطاقة الشمسية في إفريقيا49. ولسوء الطالع أنّ الإعانات تحظى بشعبية سياسية؛ لذا يكره السياسيون قطعها. إلّا أنّه لا يمكن الدفاع عنها؛ فبدلًا من التخفيف من حدّة الفقر، كما قد يقصد صانعو السياسات، تحول إعانات الكيروسين بين الناس وبين الوصول إلى الطاقة بالاعتماد على مصدر وقود باهظ الثمن، وينتج ضوءًا منخفض الجودة، وتنبعث منه أبخرة قاتلة، فضلًا عن أنّه أعاق نمو الطاقة الشمسية خارج الشبكة في آسيا مقارنة بالانتشار السريع في إفريقيا.

على الرغم من أنّ دعم الكيروسين هو المثال الأبرز على السياسات غير الموفقة، فإنّ هناك سياسات أخرى تهدّد أيضًا قدرة شركات الطاقة الشمسية خارج الشبكة على اكتساب قوّة جذب العملاء. والمثال الآخر في الهند أيضًا هو أسعار الكهرباء المنخفضة بشكل مصطنع، التي تحظى

بشعبية سياسية بين العملاء أصحاب المساكن؛ حيث تجعل هذه الإعانات من الصعب على شركات الطاقة الشمسية تسويق الأنظمة خارج الشبكة التي من شأنها أن تكمل طاقة الشبكة في المناطق التي بها خدمة كهرباء غير موثوقة. وتؤدّي هذه الإعانات أيضًا إلى إفلاس المرافق، ما يجعل من الصعب عليها تحديث شبكة الطاقة المتعثّرة.

و تُعدّ العوائق التجارية مثالًا جيدًا آخر على السياسة المشوهة، فمن الأسباب التي أدّت إلى انطلاق الطاقة الشمسية خارج الشبكة في شرق إفريقيا أنّ التعريفات الجمركية ورسوم الاستيراد منخفضة نسبيًّا، ما يمكّن شركة أوف غريد إليكتريك وغيرها من الشركات من استيراد مكوّنات أنظمتها الشمسية من جميع أنحاء العالم، ونقلها بحرّية بين مقر عملياتها في تنزانيا ورواندا. ويحدث النقيض من ذلك في غرب إفريقيا، حيث تجعل التعريفات والرسوم المرتفعة تشغيل سلاسل الإمداد العالمية أكثر تعقيدًا وتكلفة، ما يؤدّي في النهاية إلى زيادة تكلفة الطاقة الشمسية خارج الشبكة. لذا، فإنّ الدرس المستفاد للبلدان التي تسعى لتسخير الطاقة الشمسية خارج الشبكة وتحسين الوصول إلى الطاقة المحلية، هو إزالة الحواجز التجارية التي قد تزيد بشكل مصطنع من تكلفة أنظمة الطاقة الشمسية.

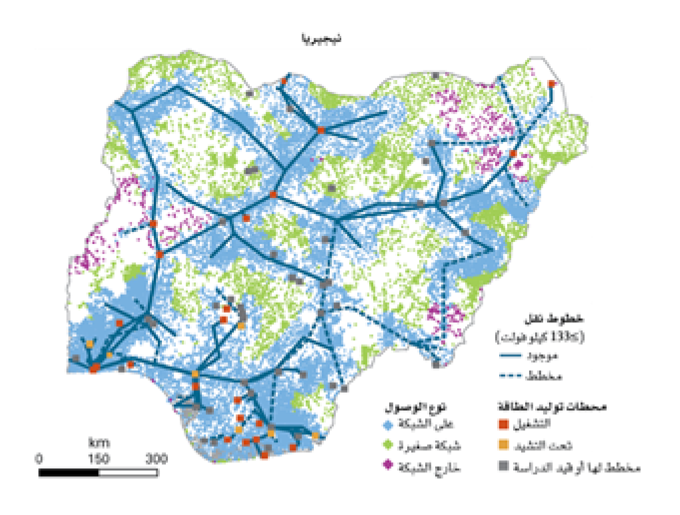
إن رفع الدعم الحكومي مطلب أساسي لتفعيل الابتكار؛ ليتسنى للسياسة العامة تمكين نشر الطاقة الشمسية خارج الشبكة، ولكنّ هذا القطاع سيحتاج إلى دعم نشط لكي يزدهر. ويتمثّل الدور الأكثر أهمّية الذي يمكن أن تؤدّيه الحكومات لصياغة خطة وطنية للوصول إلى الطاقة في مساعدة شركات الطاقة الشمسية خارج الشبكة في تركيز جهودها بشكل أكثر فاعلية. ومن دون مثل هذه الخطة، قد تخشى الشركات التي تُسوِّق أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية أو الشبكات الشمسية الصغيرة في المناطق النائية من الاستغناء عنها عندما تصل الشبكة في نهاية المطاف. مثلًا، وجدت دراسة استقصائية أجريت في الهند أنّ خوف الشركات من وصول الشبكة الرئيسة كان العائق الأكثر شيوعًا لتطوير الشبكات الصغيرة في البلاد.50

بالمقابل، إذا حدّدت الحكومة المناطق التي تكون نسبة احتمالية توسيع الشبكة الرئيسة فيها أكبر، وفي الوقت نفسه حدّدت المناطق التي قد يكون من الأفضل اقتصاديًا خدمتها بحلول من خارج الشبكة، فيمكن عندئذٍ تقليل مخاطر المنافسة بينهما. ومن خلال توضيح المعايير الفنية لكيفية ربط الشبكات الصغيرة بالشبكة الرئيسة، تستطيع الحكومات مساعدة شركات الطاقة الشمسية خارج الشبكة في التخطيط لتمديد الشبكة في نهاية المطاف، ومن ثم حمايتها من فقدان استثماراتها.51

بدأت العديد من الدول القيام بذلك. وتعدّ نيجيريا واحدة من أكثر الأمثلة إثارة، فهي الدولة الثانية على مستوى العالم من حيث عدد السكان غير المتصلين بالكهرباء. وتخطط الحكومة هناك لإيصال الكهرباء إلى 75 بالمئة من البلاد بحلول عام 2020م، معتمدة بذلك على الطاقة الشمسية خارج الشبكة لاستكمال جهود توسيع الشبكة. كما أنّها تعيّن بعض المناطق على أنّها مثالية لأنظمة الطاقة

الشمسية المنزلية القائمة بذاتها أو الشبكات الشمسية الصغيرة المعزولة، مثل المناطق قليلة السكان، أو شديدة المنحدرات، أو التي تتطلب خطوط نقل جديدة عالية التكاليف. وقد حدّدت أيضًا مناطق أخرى بوصفها أهدافًا لتوسيع الشبكة المركزية في المستقبل. أخيرًا، اختارت بعض المناطق، مثل تلك التي يوجد فيها اتصال بالشبكة، ولكنه ضعيف أو غير موثوق به، بوصفها الأنسب للشبكات الصغيرة لدعم وصول الكهرباء على المدى القريب، مع خيار للحكومة في حال توسّعت الشبكة الرئيسة مستقبلًا بأن تُربط بالشبكات الصغيرة في نهاية المطاف.

وقد تعهّدت الحكومة إذا حدث ذلك بتعويض مزوّدي الشبكات الصغيرة، إما بشراء البنية التحتية الخاصّة بهم أو السماح لهم بمواصلة العمل بوصفهم موزّعين محليين للكهرباء من الشبكة الرئيسة المدمجة والشبكة الصغيرة52. وفي إعدادها لهذه التعيينات الجغرافية، استفادت نيجيريا من الدراسات التي تنظم عمليات المحاكاة الحاسوبية للتنبؤ بالمناطق التي تخدم بشكل أفضل الشبكات الصغيرة أو الشبكة الرئيسة أو كليهما (انظر الشكل 5.4)53. ومن خلال توضيح هذه الرؤية الشاملة، يكون القطاع العام قادرًا على توفير الأمان لمزوّدي الطاقة الشمسية خارج الشبكة، وتشجيعهم على تلبية الحاجات التي تتجاوز قدرة الحكومة.



الشكل (5.4): استخدام الشبكات المصغّرة وامتدادات الشبكة الرئيسة لإيصال الكهرباء في نيجيريا. تصوّر هذه الخريطة، المستندة إلى بحث أُجري في المعهد الملكي للتقنية في السويد، النشر الأمثل للإستراتيجيات المختلفة لتحقيق خدمة كهرباء شاملة في نيجيريا. المناطق الرمادية الداكنة هي المناطق التي تعمل فيها الشبكة الرئيسة حاليًّا أو يمكن تمديدها عمليًّا، والمناطق ذات اللون الرمادي الفاتح نائيةوهي مناطق ذات كثافة سكانية منخفضة في الغالب، وليس من المنطقي من الناحية الاقتصادية توسيع الشبكة الرئيسة في تلك المناطق. أما المناطق السوداء فهي أهداف لنشر شبكات صغيرة (من المحتمل أن تعمل بالطاقة الشمسية)، التي يمكن أن توفّر في البداية وصولًا للطاقة من دون الشبكة الرئيسة، ولكن الشبكة الرئيسة قد تتصل بها في النهاية.

المصدر: أعيد طبعه من الوكالة الدولية للطاقة (International Energy Agency (IEA) (2014))، ونشر

في الأصل في مينتيس وآخرون (Mentis et al. (2015)).

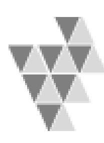
توجد طريقة أخرى تستطيع الحكومات من خلالها تعزيز نمو الطاقة الشمسية خارج الشبكة، وهي خفض التكاليف التقنية للأنظمة خارج الشبكة. وقد برعت الهند في ذلك. وفي الواقع، يمكن أن نعزو كثيرًا من الفضل إلى الحكومة الهندية في الانخفاض الأخير في أسعار مصابيح توفير الطاقة، كما أن إستراتيجيتها يمكن أن تنجح بشكل جيد لخفض تكلفة أجهزة التيار المستمر الأخرى. لتقليل تكاليف التقنية، اشترت الحكومة من خلال وكالة تسمّى خدمات كفاءة الطاقة المحدودة Energy Efficiency Services Limited -EESL، مصابيح توفير الطاقة بكمّيات ضخمة، ما مكّنها من توزيعها وبيعها بأسعار منخفضة للغاية. وباعت الوكالة حتى نهاية عام 2016م، أكثر من 200 مليون مصباح، وخفّضت أسعارها في الهند إلى أقل من الأسعار في الدول الغربية.54 وتنافس كبار المورّدين- بما في ذلك شركة فيليبس- بقوّة، وعملوا بشكل محموم على تحسين منتجاتهم؛ للفوز بعقود كبيرة ومربحة مع الوكالة الهندية.

وقد أبلغني سوراب كومار؛ مدير هذه الوكالة، بحماس خلال وجبة الإفطار ذات يوم أنّ التقنية التالية التي كان يستهدفها هي مكيفات الهواء. فإذا تمكّنت الهند من خفض التكلفة وزيادة كفاءة أجهزة تكييف الهواء التي يمكن أن تكون المحرّك الأكبر الوحيد للطلب على الكهرباء في الهند في العقود القادمة، فيمكنها توفير الطاقة الحديثة لمئات الملايين من الناس من دون زيادة انبعاثات الكربون في الهند بشكل كبير. ومن خلال شراء أجهزة التيار المستمر الأخرى بكمّيات كبيرة، يمكن أن تجعل الشبكة الصغيرة للتيار المستمر عرضًا ذا تكلفة في متناول الجميع.

حاجة أخرى يمكن أن يساعد القطاع العام في تلبيتها تتمثّل في ندرة المهنيين المدرّبين على تركيب أنظمة الطاقة الشمسية وصيانتها،55 إذ تستطيع الحكومات تمويل مراكز لتدريب فنيي الكهرباء. على سبيل المثال، بينما تقوم شركة أوف غريد إليكتريك وغيرها من الشركات بالفعل بتدريب بعض المتخصّصين في الخدمة داخل الشركة، فإنّ الشركات الناشئة لم تتمكّن بمفردها من تدريب عدد كافٍ من المهنيين لتلبية الطلب المتزايد في هذا القطاع.

أخيرًا، يستطيع القطاع العام أن يساعد في إطلاق صناعة الطاقة الشمسية خارج الشبكة من خلال توفير رأس المال المنخفض التكلفة. وتستطيع كلّ من الحكومات والمؤسّسات المالية الدولية، مثل البنك الدولي على وجه الخصوص، المساعدة في توفير رأس المال العامل القادر على تمويل حاجات مزوّد خارج الشبكة لبناء مخزونه وأنظمة الطاقة الشمسية. إن هذه الصناعة يجب أن تكون على المدى الطويل في طريقها للاكتفاء ذاتيًّا، حيث يتعين أن يكون مقدّمو الطاقة الشمسية قادرين على الاستفادة من أسواق رأس المال- مثلًا، من خلال التوريق- لتمويل خدمات تأجير الطاقة الشمسية المنتهي بالتمليك للعملاء. وقد يقدّم القطاع العام قروضًا أو منحًا لرأس المال العامل منخفض التكلفة لوضع الصناعة على مسار النمو المستدام ذاتيًّا.56 ومرة أخرى، يجب أن يشبه هذا الدعم عجلات التوازن، وليس عكازًا دائمًا.

معًا، تعدّ إستراتيجية إزالة السياسات المعرقلة وإستراتيجية تنفيذ السياسات التمكينية أفضل طريقة لدعم صناعة الطاقة الشمسية الناشئة خارج الشبكة؛ فمن الممكن أن يوفّر الجمع بين السياسات العامة الداعمة وابتكار نموذج الأعمال المرن الأمل والطريق نحو الوصول إلى الطاقة الحديثة، لعائلة جريس السابق ذكرها وعدد آخر لا يحصى مثلها.



الجزء الثالث إعادة ابتكار الطاقة الشمسية

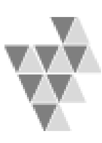
المحاور الرئيسة

• التوجّه واضح: يجب أن تعمل التركيبات الشمسية القائمة على تقنية الخلايا الكهروضوئية السليكونية الحالية على توسيع انتشارها في السوق خلال العقد المقبل، ومن الممكن بعد ذلك يمكن أن يصل نموّها إلى القمّة. إن تلبية هدف منتصف القرن للطاقة الشمسية المتمثل في تشغيل ثلث الطلب العالمي من الكهرباء سيتطلب تخزينًا للطاقة الشمسية بتكلفة منخفضة، وتخزينًا فعّالًا من حيث التكلفة للكهرباء التي تنتجها. ولكي تفي البشرية بالهدف الطويل المدى المتمثّل في تلبية غالبية حاجاتها الإجمالية من الطاقة من خلال تسخير ضوء الشمس، فستحتاج إلى ابتكار طرق لتحويل الطاقة الشمسية إلى وقود. أما تقنيات تحقيق كلا الهدفين على نطاق تجاري فهي غير متوافرة اليوم؛ لذلك فإنّ الابتكار التقني أمر ملح.

• تهيمن اليوم تقنية السيليكون على سوق الطاقة الشمسية الكهروضوئية التجارية، لكنّ الباحثين في المختبرات الأكاديمية حول العالم يحرزون تقدّمًا سريعًا في الموادّ الكهروضوئية الشمسية في المستقبل. يستكشف الفصل السادس، "ثورة من خلال التطوّر Revolution By Evolution"، التاريخ القصير والصعود الصاروخي للخلايا الشمسية المصنوعة من البيروفسكاي perovskite، وهي مادّة يمكن من خلالها تصنيع طلاءات شمسية رخيصة وعالية الكفاية، ومن الممكن طباعتها بوساطة الطابعة كما تُطبع الصحيفة. تحتل مادة البيروفسكايت حاليًا زمام المبادرة بين التقنيات الكهروضوئية الناشئة، وهناك أفكار ومواد أكثر واعدة لا تزال تحت الدراسة. ونظرًا إلى أنّ التقنيات الثورية تواجه حواجز شديدة لدخول السوق، فقد يكون من الأسهل العثور على طريق تطوّري من تقنيات الطاقة الكهروضوئية الحالية إلى تقنيات المستقبل. ومن الأساليب الواعدة لفعل ذلك وضع طبقة من البيروفسكايت فوق السيليكون، ووضع التقنية الناشئة على رأس أولوية الشركة القائمة.

• تعمل تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية -بصرف النظر عن نوع المادة المستخدمة- على تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء على الفور، وسيكون من المفيد جدًّا استخدام الفائض من طاقة الشمس عند الطلب بدلًا من التخلص منه. يناقش الفصل السابع، "تخزين أشعّة الشمس Stashing Sunshine"، تقارير عن التقدّم السريع الذي يحرزه العلماء في تخزين ضوء الشمس في مخازن أكثر ملاءمة للطاقة. على سبيل المثال، تتفوّق تقنية الأوراق الاصطناعية بالفعل على التمثيل

الضوئي الطبيعي، ويمكن أن تولد أنواعًا من الوقود التي يمكن أن تحلّ يومًا ما محلّ الزيت. توجد طريقة أخرى لتخزين طاقة الشمس وهي في شكل حرارة. لذلك يعمل العلماء على ترقية التقنية الكامنة وراء محطات الطاقة الشمسية المركزة لتركيز أشعّة الشمس على درجات حرارة أعلى من أي وقت مضى، ما يمكّن هذه المحطات من العمل على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع.



الفصل السادس ثورة من خلال التطوّر

يجلب فصل الشتاء في إنجلترا معه برودة غير مرغوب بها إضافة إلى الأيام الكئيبة المطيرة معظم العام. لذلك لا أستغرب مزاجي المكتئب الذي لا يرغب بعمل شيء وأنا داخل غرفة الاجتماعات مع مجموعة متنوّعة من طلاب الدراسات العليا وباحثي ما بعد الدكتوراه يحضرون اجتماعًا أسبوعيًّا في عام 2011م. جاء الكثير منا من مناخات أكثر اعتدالًا مثل كاليفورنيا، وإسبانيا، وإيطاليا، وجزر الكاريبي. كنا جميعًا هنا، وسط المباني الحالمة داخل جامعة أكسفورد، لنتعلّم من البروفيسور هنري سنيث Professor Henry Snaith، وهو عالم صاعد يبحث في عناصر جديدة تمامًا في مجال الطاقة الشمسية.

هنري -وهو يصرّ على أن يُنادى باسمه الأول- ليس مثل أستاذ الفيزياء العادي كما يبدو لك؛ فهو لاعب رجبي سابق في جامعة كيمبريدج، ونشيط ورياضي وتنافسي. وعندما كان يأخذ فريقنا في المختبر للتزلج في جبال الألب، كان يفوز علينا في كلّ مرة، فيسخر من الأشخاص الأبطأ (حسنًا، كنت أنا فقط). إنه أيضًا اجتماعي ولبق، خاصة عند مناقشة عمله، وهو لا يغير شخصيته سواء المختبر أو في حفل استقبال. والأهم من ذلك أنه عالم لامع لديه حدس عجيب حول كيفية تصرّف المواد بالمقياس النانوي في عالم الذرّات والإلكترونات.

ليس من المستغرب أن يكون هنري قد حظي باهتمام العلماء المشهورين في بداية حياته المهنية؛ فقد درس تحت إشراف البروفيسور السير ريتشارد فريند Sir Richard Friend في مختبر كافنديش الشهير Cavendish Laboratory في كيمبريدج، واستمر في متابعة أبحاث ما بعد الدكتوراه في سويسرا تحت إشراف البروفيسور مايكل جراتزل Michael Grätzel، وهو باحث مبجل آخر. كان لا يزال باحثًا في مرحلة ما بعد الدكتوراه عندما عقد مختبرنا اجتماعه الأسبوعي الروتيني في ذلك اليوم الكئيب. وهو عالم شاب رصين وله نحو 3000 استشهاد في أوراق بحثية1. وعلى مدى السنوات الأربع التالية، جمع هنري عشرة أضعاف هذا العدد من الاستشهادات، وصعد ليصبح ثاني أكثر العلماء استشهادًا في العالم في عام 2015م2. وكما اتضح، لم يكن اجتماع المختبر هذا روتينيًّا.

كشف مايك لي، أحد زملائي من طلاب الدراسات العليا، عن أمر مذهل؛ فقد سافر إلى اليابان بناءً على طلب هنري؛ لتعقب وصفة كيميائية اخترعها باحثون في جامعة طوكيو لصنع خلايا شمسية جديدة. وعندما كان يعمل مقاومًا النعاس في وقت متأخر من الليل بعد عودته إلى أكسفورد قلب مايك عن طريق الخطأ اثنين من التركيزات الكيميائية في وصفته؛ فنتج عن هذا الخطأ خلية شمسية

كهروضوئية ذات كفاءة تزيد عن 10 بالمئة، قادرة على تحويل أكثر من 10 بالمئة من طاقة الشمس التي تحولها إلى كهرباء.

مقارنةً بكفاءة الخلايا الشمسية السيليكونية التقليدية التي تزيد عن 25 بالمئة، كان رقم مايك غير ملحوظ، لكنها كانت قفزة كبيرة لمادة غير مستخدمة تجاريًّا بالفعل. كان مختبرنا (بالإضافة إلى مجموعة متفرّقة من الباحثين حول العالم) يحاول الابتعاد عن قيود السيليكون، مثل الحاجة إلى معدات تصنيع باهظة الثمن والجودة ورقائق السيليكون التي نتجت منها الألواح الصلبة القبيحة. اعتقدنا أنّ الطابعة الرخيصة النافثة للحبر قد تكون قادرة باستخدام المواد المناسبة على إنتاج لفات من الطلاءات الكهروضوئية الشمسية المرنة والفعّالة التي تمكّننا من وضع موادّ منتجة للطاقة على أجزاء من المباني التي لا تدعم الألواح الشمسية، وقد تزيد من جاذبية الطاقة الشمسية أيضًا. إلّا أنّ أفضل نتيجة حقّقها أيّ شخص منا بعد أكثر من عقد من الزمن، كانت كفاءة بنسبة 7 بالمئة. وتمكّن مايك من الوصول إلى أكثر من 10 بالمئة باستخدام مادة جديدة تمامًا كان قد عثر عليها ولم يتم تحسينها بعد - وهو ما يعادل إصابة قلب الهدف في لعبة السهام (الدارتس) ونحن معصوبي العينين. وبعدما استوعبنا النتائج، زاد تلهّف فريقنا من الباحثين المتفاجئين والواثقين من أن تضافر الجهود لتطوير المادة يجب أن يجعل تحسين الكفاية إلى 20 بالمئة وما بعدها ممكنًا.

تُعرف المادة التي عدّلها مايك لتصل إلى مثل هذا التأثير الدرامي باسم "بيروفسكايت"، وعلى عكس نظائرها من السيليكون، فإنّ خلايا البيروفسكايت الشمسية سهلة الصنع في المختبر، فضلًا عن أنها متعدّدة الاستخدامات بشكل مذهل، ما يتيح متغيّرات مرنة وملوّنة وشبه شفّافة وخفيفة الوزن. وبمجرّد الإعلان عن نتائج مايك، أثارت فكرة امتلاكها لهذه الخصائص إضافة إلى الكفاءة العالية في امتصاص أشعّة الشمس وتحويلها إلى كهرباء اندفاعًا للطاقة الشمسية.

كان لمختبرنا السبق، حيث وزّع هنري بقية الفريق بذكاء لمعرفة أكبر قدر ممكن من المعلومات حول هذه المواد، بينما أعدّ هو ومايك إعلانًا للعالم في صفحات المجلة المرموقة؛ ساينس (Science)3. كانت لدينا في الأيام الأولى مجموعة صغيرة من الباحثين، وكنا كالأطفال في ساحة اللعب، نلعب بالبيروفسكايت بأيدينا. كنت مبتهجًا لأنّ البيروفسكايت كان يتصرّف مثل الغبار السحري في جميع تجاربي الحالية، فقد حوّل تصميمات الخلايا الشمسية الغريبة إلى أجهزة ذات قيمة، لكنّ هنري كان يحثّني بلطف على إدراك أنّ البيروفسكايت كان أكثر بكثير من مجرّد غبار سحري لتجربة أخرى بل كان هو الحدث الرئيس ذاته. وبعد عام واحد في عام 2012م انتهى احتكارنا لبحوث بيروفسكايت هنري، عندما قرأ المجتمع العلمي عن التقنية، وألقى الباحثون في جميع أنحاء العالم بمشاريعهم السابقة وتراكمت في هذا المجال.

أدت هذه الموجة إلى ازدهار التعاون الدولي- ولكنّها أدّت أيضًا إلى المنافسة الشرسة. كانت الحبكة الأكثر إثارة للاهتمام تكمن في التنافس بين مختبر هنري ومعلّمه السابق مايكل جراتزل؛ فقد اكتشف

زميلي سام سترانكس ذات مرة أنّ جراتزل وزملاءه كانوا يتسابقون للفوز على سام للضغط على نتيجة بحث كان سام قد حصل عليها بشكل مستقل قبل أسابيع وقدّمها في مؤتمر. عمل هنري وسام على مدار الساعة لإعداد مخطوطتهما الخاصّة والفوز بالمعرفة، ونشرت مجلة Science في النهاية النتيجتين جنبًا إلى جنب.

إلى جانب منح الفضل لكلا الفريقين، كان النشر المتزامن إشارة قوية إلى أنّ البيروفسكايت يمثل إنجازًا مهمًّا؛ لدرجة أنه يستحقّ عمودًا إضافية في المجلات المرموقة التي تغطي عددًا لا يحصى من المجالات العلمية الأخرى.

في الواقع، نُشر من عام 2012م إلى عام 2016م فقط، ما يقرب من ثلاثين مقالة تناقش بيروفسكايت سولار في أكبر مجلّتين علميّتين؛ مجلة العلوم Science ومجلة الطبيعة Nature؛ حيث إنّ النشر في هاتين المجلتين بالنسبة إلى العالم يشبه حصول الممثّل على ترشيح لجائزة الأوسكار. أما أكثر طريقة مضمونة لنشر مقالة مرموقة تتعلّق بالطاقة الشمسية فهي تسجيل رقم قياسي عالمي جديد في الكفاءة. واستجابة لهذا الحافز واحتمال إحداث ثورة في تقنية الطاقة الشمسية، زاد العلماء من جميع أنحاء العالم، وآخرهم في كوريا الجنوبية، كفاءة خلايا البيروفسكايت الشمسية بشكل أسرع من أيّ تقنية شمسية أخرى في التاريخ (وصلت إلى أكثر من 22 بالمئة في 2016م)4.

إذا كنت متفاجئًا لأنك لم تسمع عن البيروفسكايت من قبل، فلا تفعل ذلك؛ فقلّة قليلة من الناس يفهمون مدى روعة هذه المادة الجديدة خارج عالم البحث الجامعي وروحانياته -حيث يمنح الباحثون مكانة المشاهير لآخر حامل للكفاءة- قد يكونون على دراية بالبيروفسكايت. ربما يكون بعض العاملين في صناعة الطاقة الشمسية التي يهيمن عليها السيليكون على دراية بالبيروفسكايت، لكنّهم غير قلقين من قدرتها على تحدّي السيليكون. وربما يكون عدم القلق هذا مبرّر تمامًا على المدى القصير على الأقل. إن الصخب الدائر داخل الدوائر الأكاديمية المتعلق بكفاءة الخلية ليس له علاقة كبيرة بصنع منتج تجاري يمكنه البقاء في الخارج لسنوات أو حتى عقود، كما تفعل ألواح السيليكون الحالية بانتظام. ما يحاول العلماء فعله في المختبر هو تحطيم الرقم القياسي للكفاءة، عن طريق اختيار أفضل نتيجة من اختبارات مئات الجزيئات الصغيرة من موادّ الطاقة الشمسية التي تعادل جزءًا صغيرًا من حجم ظفرك تحت مصباح خاص يحاكي أشعّة الشمس المثالية في وقت الظهيرة.

بدأ الباحثون العلميون مؤخّرًا في بناء خلايا بيروفسكايت أكبر، وإخضاعها لظروف الحرارة والرطوبة الواقعية، واختبار مدّة بقائها على قيد الحياة؛ إدراكًا منهم لما يتطلبه الأمر لجعل التقنية قابلة للتسويق التجاري. لكنّ الخلايا قد لا تغادر المختبر أبدًا ما لم تحز على اهتمام المستثمرين. ومع ذلك فإنّهم متردّدون بشأن تمويل الشركات الناشئة في مجال الطاقة الشمسية، بعد أن فقدوا استثماراتهم كلّها في طفرة التقنية النظيفة في وادي السيليكون وانهيارها من عام 2006م إلى عام

2011م. وطالما استمرّ المستثمرون وصناعة الطاقة الشمسية في تجاهل الأوساط الأكاديمية والبيروفسكايت وتقنيات الطاقة الشمسية الجديدة الأخرى، فمن الممكن أن تظلّ الإبداعات حبيسة المختبر فحسب.

يمكن أن يكون هذا الإهمال كارثيًّا لآفاق الطاقة الشمسية على المدى الطويل. يوضّح الفصلان الرابع والخامس جوانب ابتكار النماذج المالية والتجارية، وكيف يمكن لتقنية الطاقة الشمسية الحالية أن تزدهر من خلال الوصول إلى تجمّعات ضخمة غير مستغلة من رأس المال المنخفض التكلفة. قد يعمل هذا النهج بمفرده لمدّة عقد، أو ربما عقدين على الأكثر، ولكن على الطاقة الشمسية أن تفعل أكثر من مجرّد جذب الاستثمار في التقنيات الحالية لتلبية هدف منتصف القرن المتمثّل في توفير ثلث الطاقة في العالم. وكما هو موضّح في الفصل الثالث، سيتعيّن على الطاقة الشمسية أن تتغلّب على تدهور قيمتها مع زيادة الانتشار، مثل أثر انكماش القيمة الواضح بالفعل في ألمانيا وكاليفورنيا. وكذلك الضغط على شبكات الطاقة التي يجب أن تُدمج مع مصدر توليد متقطع؛ فبمجرد صعود الطاقة الشمسية لتوفير نسبة مضاعفة من الكهرباء العالمية، فإنّ هذه العقبات قد تمنعها من توفير حصّة أكبر من الكهرباء في العالم، حتى لو استمرت تكلفة أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية القائمة على السيليكون في معدّل الانخفاض الذي تمتعت به طوال نصف القرن الماضي.

يجب أن تصبح الطاقة الشمسية الكهروضوئية أرخص مما هي عليه لتجنّب تباطؤ النمو، وعليها للقيام بذلك أن تكون أكثر كفاءة مما يسمح به السيليكون على الإطلاق، ولهذا السبب أصرّت مجموعة من علماء الطاقة الشمسية البارزين في عام 2016م على أنّ أبحاث الطاقة الشمسية لم تنتهِ بعد، بحجة:

"في حين أنّ النجاح المذهل للخلايا الشمسية الكهروضوئية -photovoltaics ينبغي الاحتفاء به، فقد شعر العديد من باحثي الخلايا الكهروضوئية بالفزع مؤخرًا لرؤية تقلّص التمويل العام للبحث والتطوير في مجال الطاقة الكهروضوئية (سواء في الولايات المتحدة أم في دول أخرى)... لتحقيق انتشار أعلى للسوق، يجب أن تكون تكلفة الأنظمة الكهروضوئية أقلّ لتغطية التكاليف الإضافية للتخزين أو النقل؛ بحيث يمكن نقل توليد الطاقة الشمسية لتلبية الطلب على الكهرباء بشكل فعّال من حيث التكلفة على نطاق أوسع في كلّ من الزمان والمكان"5.

من حسن الطالع، فإنّ الأبحاث المثيرة على العديد من الجبهات لديها القدرة على تحسين أداء الطاقة الشمسية الكهروضوئية وجعلها أرخص بكثير. وتكمن التقنيات المستقبلية في طيف من التطوّر الثوري؛ حيث6 تتمتّع التحسينات التطوّرية للتقنيات الحالية بفرصة أفضل في الظهور التجاري لأول مرة على المدى القريب (تذكّر أنّ الابتكار الناجح هو الذي يصل إلى السوق). أما الخيار التطوّري الواعد في الوقت الحالي فهو استخدام مادة البيروفسكايت أو موادّ أخرى على ظهرها مباشرة فوق الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون الموجودة؛ ذلك أنّ الجمع بين السيليكون

والبيروفسكايت سيؤدّي إلى تعزيز كفاءة الألواح الحالية، مع ترك عملية الإنتاج الحالية والمنتج النهائي إلى حدّ كبير كما هي، ما يزيد من فرص قبول السوق لها.

أما في المستقبل، فستكون هناك حاجة إلى مفاهيم ثورية مختلفة عن الألواح الكهروضوئية الموجودة اليوم. وتتطلب هذه التطوّرات الاستثمار في الوقت الحالي حتى تتمكّن في النهاية من تحقيق فوائد هائلة؛ فالتطوير طريق يمكن أن يؤدّي إلى ثورة. على سبيل المثال، إن وضع طبقات من البيروفسكايت فوق السيليكون على المدى القريب يمكن أن ينتج في النهاية طلاءات شمسية من البيروفسكايت أكثر كفاءة وتنوّعًا، متجاوزًا الحدود التي تقيّد تقنية السيليكون.

وعلى الرغم من أن مادة البيروفسكايت هي الرائدة في المختبر، إلا أنه قد تكون لها عيوب، وهي ليست المادة الشمسية الواعدة الوحيدة الموجودة حاليًّا؛ فقد تأتي الأساليب الأخرى بمزاياها الفريدة، بما في ذلك الخلايا الشمسية العضوية والخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية (quantum dot solar cells). ومع هذه التقنيات يمكن أن تأتي درجات ألوان وشفافية ومرونة لا حصر لها، فضلًا عن كفاءة لا مثيل لها من الناحية النظرية.

هذه التقنيات الجديدة كلّها يمكن أن تتيح مجموعة من التطبيقات؛ فبإمكانها تغطية أسطح الأكواخ الضعيفة في الأحياء الفقيرة بالمدن، وتزويد العمليات العسكرية المنتشرة في الخطوط الأمامية بالطاقة، وإعطاء المهندسين المعماريين لوحة ألوان متنوّعة لتصميم المباني الجميلة الموفّرة للطاقة. وقد يغطي نسيج شمسي عالي الكفاية الصحاري؛ وقد تبيع محلات موادّ البناء، مثل شركة Home Depot، الطلاء الشمسي بثمن قليل مثل ورق الحائط. وبإمكان التقنيات الجديدة أن تجعل من الممكن حتى تحقيق فكرة وُصِفت بأنها من الخيال العلمي: الطاقة الشمسية الفضائية، التي من شأنها أن تسخّر إمدادًا من ضوء الشمس على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع، وتشعّ الطاقة إلى سطح الأرض.

لا نعرف في الوقت الحالي أيّ تقنيات الطاقة الشمسية وتطبيقاتها ستتمكن من التربُّع على عرش نظام الطاقة الذي يهيمن عليه الوقود الأحفوري اليوم. ولذلك، فإنّ من المنطقي أن نملأ جعبتنا من التقنية بأكبر عدد ممكن من السهام القوية. يدرك هنري سنيث أنّ الحواجز العالية تقف في طريق أي مبتدئ يهدف إلى تحدّي هيمنة السيليكون على صناعة الطاقة الشمسية. لكنّ هذا لم يمنعه من المحاولة؛ فقد أسّس شركة أكسفورد الكهروضوئية Oxford PV الناشئة التي أحدثت ضجة أكثر من أيّ شركة ناشئة تعمل في مجال الطاقة الشمسية منذ سنوات. وهو مع ذلك لا يستطيع فعل ذلك بمفرده؛ لأنّ الأمر يتطلّب مشاركة العلماء ورجال الأعمال والمستثمرين والشركات، والأهم من ذلك، صانعي السياسات للمساعدة في نشر تقنيات الطاقة الشمسية الناشئة.

من الفوتونات إلى الإلكترونات

لفهم ما تتطلّبه زيادة كفاءة الخلايا الكهروضوئية، فكّر في كيفية تحويل خلايا السيليكون ضوء الشمس الوارد إلى كهرباء؛ حيث يتضمّن إنتاج الكهرباء الشمسية اثنين من الجسيمات الأولية في الطبيعة: الفوتون والإلكترون. الفوتونات هي جسيمات خفيفة من الضوء، ترتبط طاقتها ارتباطًا مباشرًا بلونها. على سبيل المثال، تحتوي الفوتونات الزرقاء على طاقة أكثر من الفوتونات الحمراء؛ وتمتلك فوتونات الأشعّة فوق البنفسجية غير المرئية طاقة أعلى. وفي حين أنّ فوتونات الأشعّة تحت الحمراء - غير المرئية أيضًا - منخفضة الطاقة، أما الإلكترونات فهي جسيمات سالبة الشحنة تحيط بنواة الذرّة موجبة الشحنة.

تُجنّد الخلية الشمسية كلا الجسيمين عن طريق نقل الطاقة من كلّ فوتون وارد إلى إلكترون، وبمجرّد منح الإلكترون دفعة من الطاقة، فيمكنه أن يتحرّر من ذرة مضيفه ويخرج من الخلية الشمسية؛ حيث يمثّل تيّار الإلكترونات الخارج من الخلية الشمسية الكهرباء. وتعتمد كمّيّة الطاقة التي تضخّها الخلية الشمسية على قيمتين. أولًا، يرتبط "الجهد الكهربائي" بكمّية الطاقة الموجودة في كلّ إلكترون يتدفّق من الخلية الشمسية. ثانيًا، يعتمد "التيار الكهربائي" على العدد الإجمالي للإلكترونات التي تغادر الخلية الشمسية في كلّ لحظة. أما ناتج الطاقة لخلية شمسية- أي مقدار الطاقة الكهربائية التي تضخّها في كلّ ثانية - فهو مجرّد الجهد مضروبًا في التيار.

لذا، إذا نقلت خليّة شمسية كامل الطاقة من كلّ فوتون وارد إلى إلكترون، وتأكّدت من أنّ كلّ إلكترون نشط قد ترك الخلية الشمسية للقيام بعمل كهربائي مفيد، فسيؤدّي ذلك إلى زيادة جهدها الكهربائي وتيارها وإخراجها للطاقة، وستكون فعّالة بنسبة 100 بالمئة. ولكن حتى أفضل خلايا السيليكون لا يمكنها جمع سوى ربع هذا الرقم؛ لماذا؟ يعود ذلك إلى أنّ السيليكون من أشباه الموصلات -مادّة يمكنها التبديل ذهابًا وإيابًا بين حالة موصل للكهرباء وعازل- ما يجعل من الممكن للإلكترونات التبديل بين البقاء في مكانها والتحرك عندما تضربها الفوتونات. وتتميز أشباه الموصلات بميزة أساسية تحدّ من كفاءتها: فكلّما زاد عدد الفوتونات التي تمتصها الخلية، قلّت طاقة كلّ فوتون يمكن نقلها إلى كلّ إلكترون. بعبارة أخرى، هناك مفاضلة بين الحدّ الأقصى للتيار والجهد الذي يمكن أن تنتجه الخلية الشمسية، على الرغم من أهمّية كلا الكمّيتين في إنتاج طاقة الخلية. وكلّما زاد التيار، قلّ الجهد، وكلّما زاد الجهد، قلّ التيار. ونظرًا إلى أنّ الناتج الكهربائي هو ببساطة الجهد مضروبًا في التيار، فتظل الكفاءة بنسبة 100 بالمئة بعيدة المنال.

تنبع تبادلية الجهد والتيار من خاصّية لأشباه الموصلات تسمّى "فجوة النطاق bandgap ": وهو مقدار الطاقة التي يحتاجها الإلكترون للتحرّر من الذرّة المضيفة للمساهمة في الناتج الكهربائي للخلية؛ حيث يمرّ الفوتون ذو الطاقة الأقلّ من فجوة النطاق مباشرة عبر الخلية الشمسية. ويستطيع الفوتون الذي يحتوي على طاقة أكبر من فجوة النطاق نقل ما ينتج من الطاقة فقط إلى الإلكترون وتُهدر بقية طاقة الفوتون بوصفها حرارة.

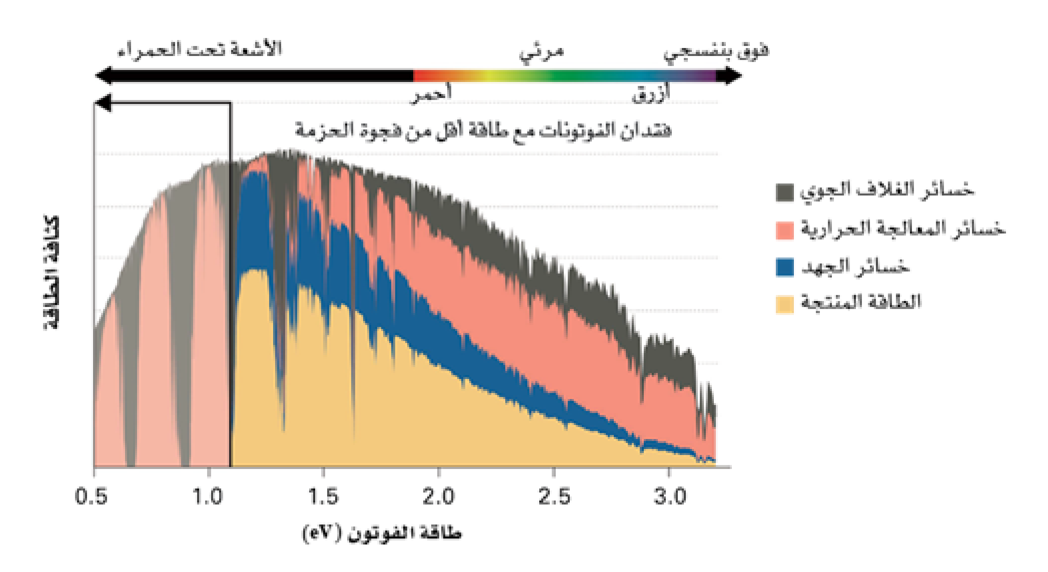
فكّر في فجوة النطاق الخاصّة بأشباه الموصلات بوصفها مقدار القوّة اللازمة لتدفّق الكاتشب العالق في الزجاجة؛ فلن يؤدّي النقر على الجزء السفلى بخفّة شديدة إلى تدفّق الكاتشب (على غرار الفوتون المنخفض الطاقة الذي يمرّ مباشرة عبر الخلية الشمسية). إن الضرب بالقدر المثالي من القوّة سينقل طاقة كافية لتدفّق الكاتشب خارج الزجاجة (مثل فوتون مع طاقة مساوية للفجوة النطاق، ما يجعل الإلكترون يتدفّق خارج الخلية الشمسية). وسيؤدّي ضرب الزجاجة بمطرقة ثقيلة إلى تدفّق الكاتشب أيضًا، ولكن على حساب إنفاق كثير من الطاقة في رفع المطرقة وإهدار معظم هذه الطاقة (مثل فوتون فوق بنفسجي عالي الطاقة ينقل القليل من طاقته إلكترون ثم تبديد الكثير من الحرارة).

لتحقيق كفاءة عالية، يتعيّن على العلماء اختيار مادّة ذات فجوة طاقة مثالية؛ فإذا كانت فجوة النطاق عالية جدًّا، فستفتقر معظم الفوتونات إلى الطاقة اللازمة لإخراج الإلكترونات، وستمرّ مباشرةً عبر الخلية الشمسية، وتفشل في توليد الكثير من التيار الكهربائي. أما إذا كانت فجوة النطاق منخفضة للغاية، فإنّ معظم الفوتونات ستحرّر الإلكترونات ولكنها تنقل فقط كمّيّة من الطاقة إلى كلّ منها، ما يؤدّي إلى انخفاض الجهد. ويمتلك السيليكون فجوة نطاقية جيدة في مكان ما في الوسط، على الرغم من أنّها أقلّ قليلًا من تلك الموجودة في أشباه الموصلات والتي تُعدّ أكثر مثالية، مثل زرنيخيد الغاليوم، الذي يستخدم في صنع خلايا شمسية أكثر كفاءة ولكنه مكلف للغاية لتحقيق النجاح التجاري. تشير النماذج النظرية إلى أنّ أعلى كفاءة للسيليكون تبلغ قرابة 29 بالمئة؛ أي أقلّ بنقطتين مئويتين من تلك الموجودة في زرنيخيد الغاليوم.

وعلى الرغم من التطوير لأكثر من نصف قرن، فإنّ السيليكون قد زاد قليلًا على 26 بالمئة من الكفاءة؛ أي أقلّ من الحدّ الأقصى النظري؛ لماذا؟ يكمن السبب في الرحلة التي يمرّ بها الإلكترون من التحرير بوساطة الفوتون إلى الخروج بنجاح من الخلية الشمسية؛ فقد اتضح أنّ المسار مليء بالعثرات الخطرة، تتصرّف فيها الإلكترونات مثل السائقين المخمورين. فإذا اصطدم إلكترون متنقّل بعائق أو مصيدة، فكونها حرارة ضائعة قد تؤدّي إلى فقد بعض الطاقة التي يمنحها الفوتون أو كلّها. إن المادة الشمسية التي هي شبكة بلّورية؛ أي إنّ ذراتها مرتّبة بشكل مثالي في نمط متكرّر، لن تشكل أيّ عوائق أمام الإلكترونات التي تسير عبر الشبكة باتجاه دائرة خارجية. لكنّ البلّورات الواقعية تحتوي على عيوب أو شوائب يمكن أن تعيق رحلة الإلكترون. ولذلك، يتطلب الأمر معدّات باهظة الثمن ودرجات حرارة أعلى من 1000 درجة مئوية لإنتاج سيليكون عالي النقاء مع عدد قليل جدًّا من العيوب. وهذه العيوب المتبقية، إضافة إلى العيوب الموجودة في الواجهات بين السيليكون والطبقات الأخرى للخلية الشمسية النهائية، تمنع بعض الإلكترونات من الوصول إلى الدائرة الخارجية، ما يقلّل من كفاءة الخلايا الحقيقية التي تقلّ عن حدّها النظري.

تُلخَّص هذه العملية في الشكل (6.1) الذي يشرح الخسائر المختلفة التي تتعرّض لها خلية شمسية من السيليكون في محاولة تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء. يُظهر المحور السيني x-axisنطاق طاقات أو ألوان الفوتون المختلفة المنبعثة من الشمس. وبالنسبة إلى كل لون، تلخص قيمة المحور الصادي

axis-y الطاقة من جميع الفوتونات التي تمّر عبر 2m-1 2م1 كلّ ثانية، والمعروفة باسم "كثافة الطاقة power density" لذلك اللون.



الشكل (6.1): تسخير ضوء الشمس باستخدام خليّة شمسية من السيليكون. يعرض هذا الرسم البياني إجمالي الطاقة المتجسّدة في ضوء الشمس والخسائر المختلفة التي تكبّدتها خلية شمسية من السيليكون في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء.

تمثل منطقة "خسائر الغلاف الجوّي atmospheric losses" الطاقة المفقودة عندما ينتقل ضوء الشمس من الفضاء الخارجي عبر الغلاف الجوي للأرض، وتصطدم الفوتونات بجزيئات الهواء قبل أن تصل إلى خلية شمسية على سطح الأرض. تبدأ الآن الخلية الشمسية في مضاعفة الخسائر؛ حيث يمر كلّ فوتون أقلّ من فجوة النطاق الخاصّة بالسيليكون، وهو 1.1 إلكترون فولت ("إلكترون فولت volt-electron " أو "eV"، وهو مجرّد مقياس للطاقة المناسبة لجسيم صغير مثل الإلكترون) عبر الخلية الشمسية. ينقل كلّ فوتون فوق فجوة النطاق فقط ما يعادل طاقة فجوة النطاق إلى إلكترون، ما يهدر الباقي بوصفه حرارة. وهكذا، بعد هذه "الخسائر الحرارية"، تمتلك إلكترونات خلية السيليكون الشمسية بالفعل أقلّ من نصف الطاقة التي جلبتها فوتونات الشمس إلى سطح الأرض، وتفقد الإلكترونات من هناك المزيد من الطاقة؛ لأنّها تتعرّج وتتعثّر في طريقها نحو المخرج كالمخمور، وتصطدم بالتشوهات البلّورية والفجوات في أثناء ذلك، فتعمل "خسائر الجهد" هذه على التقليل من إنتاج الطاقة الكهربائية للخليّة الشمسية، وما تبقى ـالمنطقة المسماة "إنتاج الطاقة"ـ فيمثّل كفاءة بنسبة 25 بالمئة فقط أو أقلّ من ضوء الشمس الساقط على الخلية الشمسية.

كانت الحكمة السائدة بين الخبراء لعقود من الزمن أنّ الأمر سيستغرق معالجة درجات حرارة عالية ومعدات باهظة الثمن لإعداد موادّ بلّورية عالية النقاء، مثل السيليكون؛ لزيادة كفاءة الخلايا

الشمسية. وكان الوصول أيضًا إلى كفاءة بنسبة 30 بالمئة أو أعلى أمرًا غير ناجح تجاريًّا؛ وذلك للطرق الغريبة المستخدمة، مثل تكديس طبقات من أشباه الموصلات التي كانت باهظة التكلفة تقليديًّا؛ بعضها فوق بعض لالتقاط المزيد من الطيف الشمسي. لكنّ تقنية البيروفسكايت حطّمت كلا الافتراضين التقليديين، ما أجبر العلماء على إعادة التفكير فيما إذا كان السيليكون هو أفضل تقنية موجودة بالفعل.

الفزّورة

على الرغم من أنه مصطلح غريب على ما يبدو، فإن البيروفسكايت ليس شيئًا جديدًا على العلماء، لا سيّما علماء الجيولوجيا، فالمصطلح ينطبق على هيكل بلّوري معين. والمعادن المختلفة التي تأخذ بنية البيروفسكايت وفيرة تحت سطح الأرض، لكنّ ما صنعه مايك في أكسفورد كان بيروفسكايت اصطناعيًّا وليس طبيعيًّا. وقد دمِجت تجربته ذرّات غير عضوية- كما هو معتاد في البيروفسكايت الطبيعي- مع جزيئات عضوية؛ فعادة ما تصنع الخلايا الشمسية عالية الكفاءة من موادّ غير عضوية تتضمّن السيليكون وزرنيخيد الغاليوم، وهي المواد التقليدية التي تُنتَج في رقائق يمكن تحويلها إلى خلايا شمسية منفصلة - بالإضافة إلى موادّ مثل تيلوريد الكادميوم (CdTe) و وسيلينيد نحاس الإنديوم غاليوم (CIGS) التي يمكن ترسيبها كشرائح رقيقة مستمرة. تُستخدم البوليمرات العضوية في البلاستيك، من بين تطبيقات أخرى، وقد عُدَّت تاريخيًّا موادّ شمسية غير فعّالة وغير موثوقة، على الرغم من أنّها أسهل في العمل وأرخص من نظيراتها غير العضوية. وكما اتضح فإنّ البيروفسكايت هجين يجمع بين أفضل عناصر مكوّناته غير العضوية والعضوية.

من الخصائص الرائعة للبيروفسكايت أنّه يتّحد بشكل طبيعي في بلّورات شبه مثالية من دون بذل كثير من الجهد على الإطلاق. ولصنع موادّ البيروفسكايت في المختبر، يخلط الباحثون المكوّنات الكيميائية للبيروفسكايت ويوزّعون بضع قطرات على شريحة دوّارة. وبعد ذلك تترك المذيبات المتبخّرة فيلمًا من بلّورات البيروفسكايت التي تكون جاهزة لتوجيه تلك الإلكترونات التائهة بكلّ أمان إلى منحدراتها الخارجية من الخلية الشمسية، تمامًا كما تترك برك المدّ والجزر بلّورات الملح على الشاطئ. لا يزال الباحثون يعملون بجد على تحسين جودة بلّورات البيروفسكايت، حيث تعدّ التحسينات التي أجروها حتى الآن سببًا رئيسًا لزيادة كفاءة خلايا البيروفسكايت الشمسية بأكثر من الضعف من عام 2012م إلى عام 2016م7.

يمكن إنتاج البيروفسكايت في درجات حرارة منخفضة، ما يجعل من الممكن إيداعها على مواد مرنة مثل البلاستيك أو الشبكات المعدنية الرقيقة للغاية،8 وذلك على عكس صنع خلية شمسية من السيليكون الذي يتطلب تسخينها إلى درجات حرارة لاستبعاد الركائز الأكثر مرونة. المرونة غير واردة بالنسبة إلى تقنية السيليكون التجارية الحالية على أي حال؛ لأنّ رقائق السيليكون هشّة للغاية،

لدرجة أنّها تتشقّق عند أدنى ضغط. (لقد عملت على خط إنتاج السيليكون، وكسرت عددًا لا يُحصى من الرقاقات عند تفريغها، والتقاطها، وفي إحدى الحالات، العطس على أحدها).

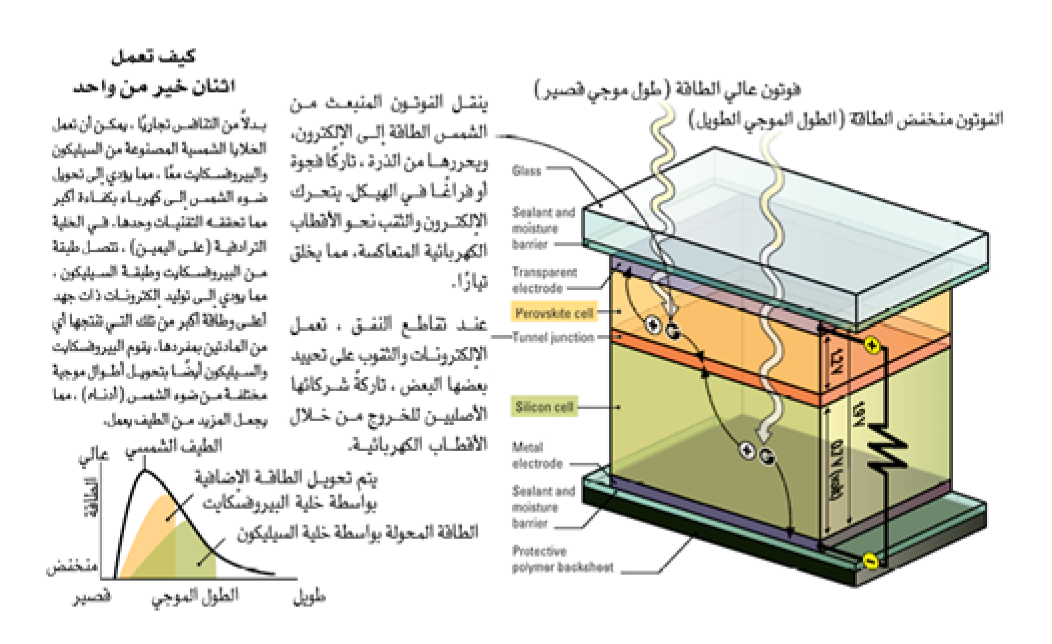
الميزة الأخرى التي يتمتع بها البيروفسكايت على السيليكون هي فجوة النطاق القابلة للتعديل؛ ففي حين أنّ فجوة النطاق للسيليكون ثابتة عند الأشعّة تحت الحمراء دون المستوى الأمثل، وهو 1.1 فولت، فإن العلماء يستطيعون ضبط فجوة طاقة البيروفسكايت عن طريق تعديل تركيبته الكيميائية. وهذه المرونة تفتح إمكانية مغرية للخلايا الشمسية الرخيصة، والمتعدّدة الوصلات التي تكدّس أشباه الموصلات ذات فجوات الطاقة المختلفة بعضها فوق بعض لالتقاط قدر من الطيف الشمسي أكبر مما يستطيع السيليكون، ففي حين أنّ مادة واحدة محدودة بكفاءة نظرية قصوى تبلغ 33 بالمئة، فإنّ سقف الخلية الشمسية المكوّنة من طبقتين يبلغ 44 بالمئة، وإضافة طبقة ثالثة تصل إلى 50 بالمئة9.

إليك كيفية عمل هذه الخلية متعدّدة الوصلات، مع الأخذ في الحسبان أنّها مجرد خلية من طبقتين أو ترادفية من أجل التبسيط. تتميز الطبقة العليا بفجوة طاقة عالية؛ لذا فهي تمتصّ الفوتونات المرئية والأشعّة فوق البنفسجية، وتحصد كمّيّة كبيرة من الطاقة لكلّ فوتون. وتحتوي الطبقة السفلية على فجوة طاقة أقلّ. وهي مثالية لامتصاص الفوتونات منخفضة الطاقة؛ فتمتصّ فوتونات الأشعّة تحت الحمراء التي تمرّ مباشرة عبر الطبقة العليا. ونظرًا إلى أنّ الفوتونات عالية الطاقة قد تمّ حصادها بالفعل، فإنّ طاقتها لا تضيع كما لو كانت الخلية تتكوّن من طبقة ذات فجوة طاقة منخفضة وحدها. وعليه، فإنّ الطبقات تخفّف المفاضلة بين امتصاص المزيد من الفوتونات وحصاد أكبر قدر ممكن من الطاقة لكلّ فوتون.

لقد طوّر الباحثون بالفعل فجوة طاقة عالية (قرابة 1.7 فولت) بيروفسكايت لطبقة فوق خلية سيليكون.10 وعلى الرغم من أنّ كفاءة التسجيل لمثل هذا الجهاز الترادفي (قرابة 24 بالمئة بدءًا من عام 2017م) كانت أقلّ من الرقم القياسي لخلية السيليكون التقليدية، إلا أن من شبه المؤكد أنّ هذه الأجهزة ستتجاوز كفاءة السيليكون في المستقبل القريب حيث يواصل الباحثون تحسينها.11 صنع آخرون خلية ترادفية مرنة من خلال الجمع بين طبقات البيروفسكايت وسيلينيد نحاس الإنديوم غاليوم.12 وتمكّن الدكتور توماس لايجتنز Tomas Leijtens من جامعة ستانفورد في عام 2016م من الجمع بين اثنين من البيروفسكايت في جهاز ترادفي فعّال بنسبة تزيد على 20 بالمئة.13 (كان توماس، وهو هولندي أشقر طويل القامة، طالب دراسات عليا معي في السابق. لذا يمكنني أن أجزم أنّ وراء مظهره غير المبالي عقل علمي لامع). فإذا كانت الخلايا متعدّدة الوصلات جميعها من البيروفسكايت، مع طبقتين أو ثلاث طبقات أو أكثر، فيمكن تحطيم سجلات الكفاءة في المستقبل، وتحويل أكثر من ثلث طاقة الشمس إلى كهرباء14.

لكن على المدى القريب، فإن الجمع بين البيروفسكايت والسيليكون (الشكل 6.2) هو أكثر طرق البحث الواعدة - تطوّريًّا وليس ثوريًا، فلا يتفق الجميع على أنّ البيروفسكايت يمكن أن يوفّر دفعة

ذات مغزىً فوق السيليكون. لكنّ النتائج واعدة حتى الآن،15 فقد كشف هنري في المقابلات الصحفية أنّ شركته؛ أكسفورد الكهروضوئية، يمكن أن تعزّز كفاءة الألواح الشمسية السيليكونية التجارية بمقدار الثلث بطبقة من البيروفسكايت.16 وعلى الرغم من أنّ الشركة في المقدّمة، فإنّ الشركات الناشئة الأخرى، مثل تلك الموجودة في الولايات المتحدة والصين، تتسابق من أجل اللحاق بالركب.



الشكل (6.2): كيف تعمل خلية بيروفسكايت/سيليكون ترادفية.
المصدر: تمت إعادة طباعة الصورة بإذن من Sivaram, Stranks, and Snaith (2015).

إذا كان وضع طبقات من البيروفسكايت فوق السيليكون ينجح، فسوف يكون مجديًا تمامًا. ستمثل معدات المصنع اللازمة لإيداع طبقة من البيروفسكايت جزءًا صغيرًا فقط من تكلفة خط إنتاج الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون، والمكاسب سوف تفوق بكثير تلك التكلفة الصغيرة. ستكون الألواح الأكثر كفاءة أرخص بكثير لكلّ واط، وستنخفض أيضًا العديد من التكاليف المرتبطة ببناء مشاريع الطاقة الشمسية، مثل الأرض والعمالة؛ لأن هناك حاجة إلى عدد أقلّ من الألواح لإنتاج الطاقة نفسها. والأهم من ذلك، سيبدو المنتج النهائي تمامًا مثل الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون التي يشعر المستثمرون والعملاء بالراحة معها، وسيصبح هذا المنتج بين عشية وضحاها أفضل صفقة في السوق.

لم يصل البيروفسكايت إلى هذا الهدف بعد، وهناك كثير من العمل الذي يتعيّن القيام به لتحسين جدواها التجارية؛ فبسبب الحوافز الملتوية للأوساط الأكاديمية، يتركز معظم الاهتمام على تعديل الصيغة الكيميائية للبيروفسكايت لزيادة كفاءتها إلى أقصى حدّ، بما يضمن بث الأرقام القياسية

العالمية الجديدة في المجلات المرموقة. كانت المتانة هي نقطة ضعف خلايا البيروفسكايت الشمسية، ويجادل بعضهم بأنّ أحد العناصر الموجودة في العديد من تركيبات البيروفسكايت (اليود) يزعزع استقرار الخلية من الداخل. وأظهر آخرون أنّ ضوء الشمس- نعم، ضوء الشمس، الشيء الذي من المفترض أن تستقبله الخلية الشمسية - يمكن أن يحلّل خلية بيروفسكايت الشمسية (على الرغم من أنها تعود إلى وضعها في الظلام). 20

من حسن الطالع، بدأ العلماء في تصميم البيروفسكايت لتكون أكثر متانة وكذلك لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة. وقد أظهرت دراسات عدّة أنّ خلايا البيروفسكايت تظلّ مستقرّة خلال أكثر من شهر من الاختبار. وأظهرت إحدى الدراسات أن استخدام الراتينج الإيبوكسي epoxy resin (يشبه الغراء المستخدم في ربط قطع الخشب معًا) يحمي البيروفسكايت من الرطوبة القاتلة عادةً على مدى عدّة أشهر من التخزين في غرفة حارة ورطبة.21 وأعاد الباحثون هندسة البيروفسكايت في عام 2017م، باستخدام بنية جديدة تمامًا لم تتآكل بعد أكثر من عام،22 فوصلت كفاءة أجهزتهم إلى نسبة 11 بالمئة فقط. لكن ما توصّل إليه العلماء فيما يتعلق بمتانة البيروفسكات يُعدّ أمرًا واعدًا؛ نظرًا إلى أنّ العلماء سيحتاجون في جذب استثمارات كبيرة، إلى دليل على أنّ خلايا البيروفسكايت الشمسية يمكنها البقاء في العالم الحقيقي لسنوات، أو حتى عقود. وبقدر ما هو غير مثير للإعجاب، فإنّ الاختبار الميداني الممتدّ في البيئات القاسية في الهواء الطلق سيكون شرطًا أساسيًّا لدخول التقنية مجال التسويق التجاري.

يجب على العلماء بالقدر نفسه من الأهمية إثبات قدرتهم على صنع بيروفسكايت أكبر بكثير من النماذج الأولية بحجم الشظية في المختبر؛ لذلك فهم بحاجة إلى ابتكار طرق لإيداع البيروفسكايت الموحّد والخالي من العيوب على مساحات أكبر. وقد صنع فريق أسترالي من مركز البروفيسور مارتن جرين Martin Green الكهروضوئي في عام 2016م خلية شمسية فعّالة بنسبة 12 بالمئة؛ كانت بحجم راحة اليد.23 ثم صنع الباحثون في المختبر الوطني الأمريكي للطاقة المتجدّدة في عام 2017م خلية بحجم أربعة أظافر باستخدام حبر بيروفسكايت خاص، وربطوها معًا لتكوين لوحة صغيرة بنسبة 13 بالمئة24.

هذه الدراسات واعدة. ومع ذلك، فإن الكفاءات التي حققتها بعيدة إلى حد كبير عن 20 بالمئة من الكفاءة التي تمكن علماء آخرون من تحقيقها في خلية واحدة بحجم ظفر الإصبع25، 26 بالرغم من أنّها تفتقد المتانة. ويقود أحد زملائي السابقين من ستانفورد، جويل جين Joel Jean، مبادرة جديدة في معهد ماساتشوستس للتقنية (MIT) لمساعدة الباحثين في تحويل خلايا بيروفسكايت الصغيرة إلى ألواح شمسية كبيرة الحجم وخفيفة الوزن ومرنة وذات كفاءة عالية؛ لاستخدامها في العالم النامي27.

العيب الأخير للبيروفسكايت لا يكاد يذكر وهو في الواقع بشكل نظري، ولكنّه قد يطلق العنان لمخيلة المستهلكين؛ فنظرًا إلى احتواء البيروفسكايت على الرصاص، فقد يُنظر إليه على أنّه غير آمن. لكن من غير المحتمل أن يشكّل محتوى الرصاص هذا أيّ خطر على الصحّة؛ فالكمّية الموجودة في الألواح الشمسية من البيروفسكايت بعد كلّ شيء، هي نفسها الموجودة في حجم مكافئ لذرّة التراب.28 وعلاوة على ذلك، إذا ظهرت طبقة البيروفسكايت لأول مرّة فوق السيليكون، فإنّ طبقات العزل المتعدّدة داخل اللوحة التقليدية ستضمن فعليًّا عدم تسرّب الرصاص.

ومع ذلك، فإنّ وجود عنصر سام قد يثير قلق العامة، وخير مثال على ما يمكن توقّعه هو تجربة فيرست سولار First Solar؛ حيث تُصنّع هذه الشركة الألواح الشمسية من تيلوريد الكادميوم التي تحتوي على عنصر الكادميوم السام. وقد واجهت الشركة معارضة من المجتمعات القريبة في الصحاري التي تستضيف منشآتها على نطاق المرافق،29 ولتهدئة مخاوفهم، أثبتت فيرست سولار أنّ ألواحها لن تطلق الكادميوم السام حتى في حرائق الغابات التي تبلغ 1000 درجة مئوية. لذا سيتعيّن على أيّ شركة بيروفسكايت في المستقبل إجراء اختبار تحمّل مماثل لمنتجها، وأيّ خطط لإغلاق البيروفسكايت بشيء أكثر هشاشة من الزجاج يمكن أن تعقّد إجراءات السلامة.

من الطرق الواعدة تخليص البيروفسكايت من الرصاص تمامًا، فقد أثبتت الدكتورة ناكيتا نويل Nakita Noel أنه يمكن القيام به عن طريق استبدال القصدير بالرصاص (كانت ناكيتا أيضًا طالبة دراسات عليا زميلة؛ ما زلت أتذكر براعتها في اللهجة الترينيدادية الرائعة وكذلك في التصميم التجريبي المثالي).30 لسوء الطالع، تُعدّ البيروفسكايت القائمة على القصدير أقلّ كفاءة حتى الآن من تلك القائمة على الرصاص؛ ولذلك لا تزال هناك مفاضلة واضحة بين الكفاءة العالية واستخدام المواد غير السامة.31 ومع ذلك، فإنّ الارتفاع السريع في كفاءات البيروفسكايت وقرار هنري التجاري الملهم الصعود على ظهر السيليكون بدلًا من منافستها، هما من الأسباب التي تدعو إلى التفاؤل بأنّ البيروفسكايت سينتقل من الاختراع إلى الابتكار، ومن التقدّم داخل المختبرات إلى العالم كلّه.

بدائل للبديل

على الرغم من أن البيروفسكايت هو الرائد بلا منازع في التقنيات الكهروضوئية الناشئة، فإنّ عيوبه تُتيح فرصة للمتنافسين الآخرين للتألق، ومنها الكهروضوئية العضوية organic PV؛ فقد حقّقت الإلكترونيات العضوية بالفعل رواجًا في مجالات أخرى. على سبيل المثال، قد يكون التلفاز أو الهاتف الذكي الخاص بك مزوّدًا بشاشة مضاءة بوساطة صمّامات ثنائية عضوية نابضة بالحياة. اليوم، لا تستطيع الخلايا الشمسية العضوية أن تتطابق مع خلايا البيروفسكايت بكفاءة، لكنها تتحسّن بسرعة.

تتمتع الخلايا الشمسية العضوية أيضًا ببعض المزايا المثيرة، على الأقلّ من الناحية النظرية؛ إذ يمكن إنتاجها من دون موادّ سامة على الإطلاق، وهي متعدّدة الاستخدامات للغاية، وقادرة على التعامل مع مجموعة كاملة من الألوان والشفافية.32 (من الممكن أيضًا إنشاء بيروفسكايت بألوان مختلفة، لكنّ المواد العضوية هي التي تتفوّق عندما يتعلق الأمر بالتنوّع). مثل البيروفسكايت، يمكن إنتاج الخلايا الشمسية العضوية في درجات حرارة منخفضة على ركائز مرنة، ويمكن أن تكون خفيفة الوزن للغاية.33 كما أنّ لديها أيضًا فجوات نطاق قابلة للتعديل، ما يجعل الأجهزة الترادفية العضوية ممكنة أيضًا34.

ومع ذلك، لا يزال أمام الخلايا الشمسية العضوية طريق طويل للحاق بالبيروفسكايت أو السيليكون، حيث قام الباحثون في الآونة الأخيرة بتحسين ضعف الاستقرار المعروف عن الخلايا الشمسية العضوية بإدخال مواد جديدة. ولكن هناك حاجة إلى مزيد من الأدلة على أنّ هذه الخلايا يمكن أن تعيش في العالم الحقيقي.35 وكانت أقصى كفاءة للخلايا الشمسية العضوية حتى عام 2017م، لا تتعدى 12 بالمئة، ويعود ذلك بشكل كبير إلى الموادّ العضوية التي تشكل النتوءات الوعرة للغاية لكي ينتقل الإلكترون عبرها.

حاول الباحثون زيادة مساحة السطح وتقليل حجم هذه المواد، وهي خطوة تشبه إلى حدّ ما استبدال جذوع الحطب بمواد سريعة الإشتعال. ولكن القيام بذلك لا يضيف سوى عوائق على السطح يمكن أن تقضي على رحلة الإلكترون. يتعامل الباحثون مع طرق أكثر جذرية لتحسين كفاءة الخلايا الشمسية العضوية؛ مثل الاعتماد على التأثير الكمّي الذي تنتقل فيه الإلكترونات خارج الخلية، ما يؤدّي إلى تجنّب الحاجة إلى إصلاح الحفر جميعها في مسار الإلكترون، ولكنّ هذه الاحتمالات لا تزال بعيدة المنال36.

مادة أخرى مثيرة تدخل في تصنيع الخلايا الشمسية، تسمّى "النقاط المية أو الكموميّة quantum dots"، ويمكنها أن تسخّر العديد من جوانب ميكانيكا الكمّ؛ كما قال الفيزيائي الشهير ريتشارد فاينمان Richard Feynman ساخرًا: "لا أحد يفهم ميكانيكا الكم". تصبح الفيزياء غريبة على مقياس النانومتر (كمرجع، النانومتر هو عرض ذرتين من السيليكون)، وهذه الغرابة هي بالضبط ما يمكن أن تستخدمه الخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية.

النقاط الكمّية هي جسيمات شبه موصلة يبلغ قطرها بضعة نانومترات فقط، وتعتمد العديد من خصائصها، بما في ذلك فجوة النطاق، على حجمها الفعلي؛ لذلك يستطيع العلماء تصنيع النقاط الكمّية بمجموعة من فجوات الطاقة فقط عن طريق تكبيرها أو تصغيرها. ومثل خلايا البيروفسكايت أو الخلايا الشمسية العضوية، من الممكن صنع خلايا شمسية ذات نقاط كمّيّة في درجات حرارة منخفضة على طاولة المختبر، ما يفتح الاحتمالات لطلاءات شمسية مرنة وخفيفة الوزن.37 في

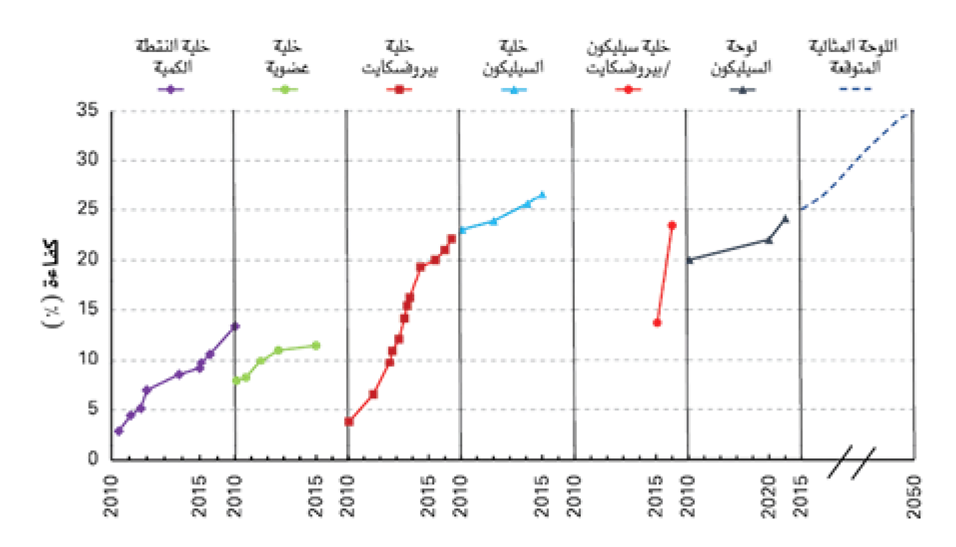
الواقع، بدأ الأكاديميون في الجمع بين التقنيات؛ فمثلًا أنشأ الباحثون مؤخرًا نقاطًا كمّيّة من البيروفسكايت لصنع خلية شمسية بكفاءة تزيد على 10٪.38

وعلى الرغم من أنّ كفاءة الخلايا الشمسية ذات النقاط الكمّية القياسية كانت حتى من عام 2017م قرابة 13 بالمئة فقط، فإنّ الباحثين لديهم بعض الحيل التي تساعدهم في زيادة هذا الرقم. وهنا تصير الأشياء غريبة: إحدى هذه الحيل، قد تكون النقاط الكمّية قادرة على نقل الطاقة من فوتون واحد إلى إلكترونين أو أكثر (عملية تُعرف باسم "توليد الإكسيتون المتعدّد")، والتي ستكون أقلّ إهدارًا للفوتونات مع طاقة تفوق فجوة النطاق. لذا، بدلًا من طمس زجاجة كاتشب واحدة بمطرقة ثقيلة، فكّر في توزيع قوّة المطرقة على العديد من زجاجات الكاتشب لتدفّق الكثير من الكاتشب.

هناك طريقة أخرى للنقاط الكمّية تسعى لتجنّب إهدار طاقات الفوتون العالية في نقل طاقة أكثر من طاقة فجوة النطاق من فوتون إلى إلكترون واحد، واستخراج الفائض من الخلية الشمسية قبل إطلاقها كحرارة (يُعرف هذا باسم إستراتيجية "الناقل الساخن hot carrier"). فقد اقترح بعض الباحثين حتى استخدام طلاء من النقاط الكمّية لامتصاص فوتونات عالية الطاقة، وإصدار ضعف عدد الفوتونات منخفضة الطاقة إلى خلية شمسية تنتظر أدناه من أجل تسخيرها بشكل أكثر كفاءة.39 وعلى الرغم من ملاحظة هذه التأثيرات في المختبر، فإنّ استخدامها لتحسين كفاءة الخلية لا يزال بعيد المنال.

الطريقة الأخيرة للاستفادة من النقاط الكمّية العجيبة هي ما يسمى "الرنين البلازموني plasmonic resonance"؛ فإذا كانت النقاط الكمّية بالحجم المثالي، فيمكن لإلكترونات موجات الضوء الواردة أن تهتز قليلًا بالتردّد الصحيح لنقل الطاقة بكفاءة عالية جدًا. 40 إليك تشبيه مقارب إلى حدّ ما لما يحدث هنا، كمغني أوبرا عندما تحطّم نغمته الصوتية كأسًا رقيقًا: نقل فعّال للغاية للطاقة، مع القليل من الفوضى.

كلّ هذه آفاق مثيرة لجيل جديد من تقنيات الطاقة الشمسية. يوضّح الشكل (6.3) الزيادة في الكفاءات للعديد من الموادّ الشمسية المختلفة جنبًا إلى جنب، ما يوضّح التقدّم السريع في المجالات جميعها. بينما توضّح المخططات الخمسة الموجودة على اليسار كفاءة الخلايا الشمسية المختلفة، فإنّ المخططين على اليمين يوضّحان كفاءة الألواح الكاملة المكوّنة من العديد من الخلايا. تكون كفاءة الألواح أقلّ من تلك الموجودة في الخلايا بسبب فقد الطاقة المصاحب لتجميع الخلايا معًا. ولأنّ الخلايا السيئة تقلّل من أداء الخلايا الجيدة، حتى مع أخذ هذه الخسائر في الحسبان، فيمكن أن ترتفع كفاءة الألواح بشكل كبير في العقود القادمة. يعرض الرسم النهائي على اليمين توقعات إحدى الدراسات حول كيفية زيادة التقنيات الجديدة من كفاءة الألواح الشمسية الكهروضوئية التجارية. ويتوقّع أنّ تصل كفاءة اللوحة إلى 35 بالمئة بحلول منتصف القرن، ضعف متوسط كفاءة اللوحة تقريبًا في عام 2016م.



الشكل (6.3): مقارنة كفاءة الطاقة الشمسية الكهروضوئية عبر التقنيات المختلفة. ترسم الألواح الستة الأولى التقدّم في الكفاءات القياسية للخلايا والألواح الشمسية المصنوعة من مواد مختلفة بين عامي 2010م و2017م. وتوضّح اللوحة الموجودة في أقصى اليمين الكفاءة للحصول على أفضل لوحة شمسية متاحة تجاريًّا بحلول عام 2050م (من المحتمل أن تتكوّن هذه الألواح الشمسية من طبقات أشباه الموصلات المتعدّدة؛ وقد تجمع أيضًا بين التقنيات الناشئة والحالية).
المصدر:بيانات كفاءة السجلات التاريخية من المختبر الوطني للطاقة المتجددة NREL وتقارير الصناعة. التقدير المستقبلي من Albrecht and Rech (2017).

لكن؛ هل يستظلّ الأكاديميون تحت الشجرة الخطأ؟ هل الكفاءة العالية ضرورية؟ هل يحتاج العالم حقًّا إلى لفّات من الطلاءات الشمسية المرنة وخفيفة الوزن؟ أم إنّ ألواح السيليكون اليوم على قدر مهمّة توفير الطاقة الشمسية الرخيصة في القرن الحادي والعشرين؟ تتطلّب الإجابة عن هذه الأسئلة الخوض في التطبيقات الممكنة للتقنيات الجديدة، وفهم ما إذا كان بإمكانها إضافة قيمة إلى الأسواق الحالية وفتح أسواق جديدة تمامًا.

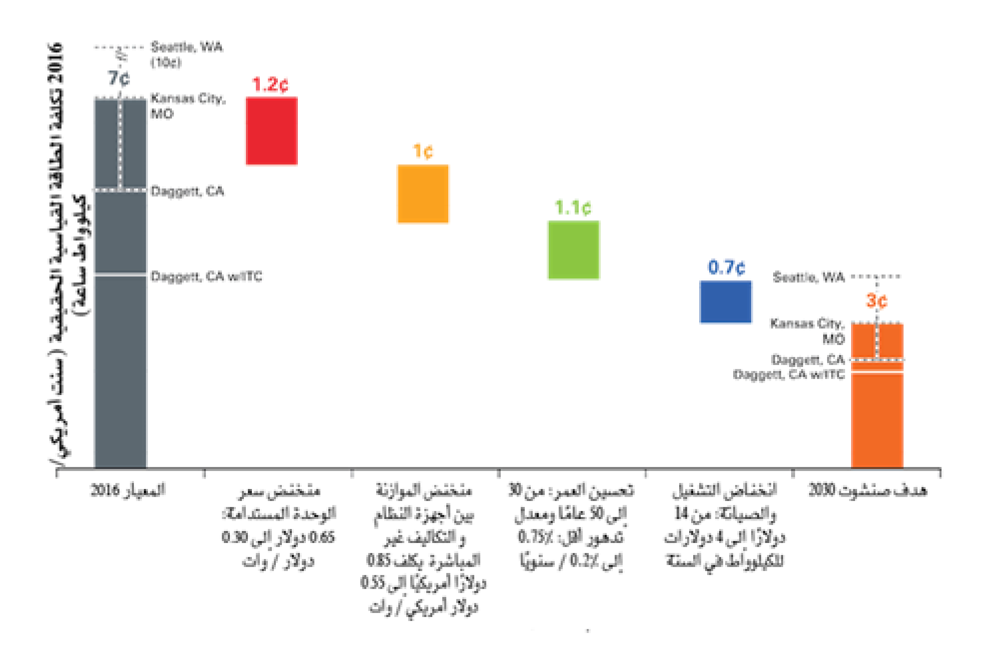
مقاس واحد لا يناسب الجميع

إنّ تأكيد أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون هي كلّ ما يحتاجه العالم لازدهار الطاقة الشمسية بشكل ضمني يجعلها رهانًا كبيرًا؛ فألواح السيليكون يمكن أن تكون رخيصة، وقياسية، ومتعدّدة الاستخدامات بما يكفي لخدمة نطاق أوسع من الاستخدامات مما تفعله اليوم. لكنّ هذا غير محتمل؛ فحتى في الأسواق الأساسية لصنع الطاقة الشمسية اليوم، على نطاق المرافق والتركيبات على الأسطح، يمكن للوحات ذات كفاءة أعلى من تلك المبيعة الآن أن تقلّل التكاليف بشكل كبير، وهو أمر بالغ الأهمية لتأمين القدرة التنافسية للطاقة الشمسية عندما يبدأ انكماش القيمة عند الاختراقات العالية. وهناك أسواق أخرى تعدّ ألواح السيليكون الكهروضوئية غير مناسبة لها اليوم،

كما هي الحال في أماكن في كلّ من العالمين المتقدّم والنامي؛ حيث الأسقف ضعيفة، وفي المناطق التي تُنفّذ فيها العمليات العسكرية، وحتى في الفضاء الخارجي.

ومع ذلك، ليس من الواضح بالنسبة إلى أسواق الطاقة الشمسية الكهروضوئية اليوم، لماذا يحتاج السيليكون إلى الاستبدال؛ لأسباب ليس أقلّها أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون ستكون أرخص، فقد انخفضت التكلفة بانتظام لعقود من الزمن بنحو 20 بالمئة لكلّ مضاعفة من إجمالي الإنتاج، حيث يُخفّض المنتجون تكاليفهم بشكل متزايد مع اكتسابهم المزيد من التوسّع والخبرة. ويتيح هذا النمط إمكانية التنبؤ بشكل تقريبي بالتكاليف في المستقبل، عن طريق وضع بعض الافتراضات حول النمو المستمر لإنتاج الطاقة الشمسية.41 وتتوقّع دراسة أجريت عام 2017م أنّ إجمالي السعة الشمسية التراكمية حول العالم قد تصل إلى 8 تيراواط (أو 8000 جيجاوات) في عام 2030م، وسيكلّف متوسّط الألواح الشمسية بحلول ذلك الوقت 0.25 دولارًا لكلّ واط من السعة المقدرة، وذلك بفضل الإنتاج المنخفض التكلفة، والكفاءات المتزايدة الأفضل، وعمر اللوحة الأطول42.

ومن المحتمل بالإضافة إلى ذلك أن تكون هناك انخفاضات في التكاليف المرتبطة بتركيب مشروع للطاقة الشمسية الكهروضوئية، بما في ذلك الأجهزة الأخرى والأراضي والعمالة والتكاليف غير المباشرة مثل التصاريح والتمويل. وقد أصدرت وزارة الطاقة الأمريكية في الآونة الأخيرة خريطة طريق تتضمّن تلك التخفيضات كلّها. ووجدت الدراسة أنّ الكهرباء التي تُولَّد من محطة للطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق قد تكلف في عام 2030م 3 سنتات فقط للكيلوواط/ساعة. (الشكل 6.4)؛ أي نصف تكلفتها تقريبًا في عام 2016م43.



الشكل (6.4): تكلفة خريطة طريق وزارة الطاقة الأمريكية- مبادرة صن شوت 2030م The DOE SunShot للطاقة الشمسية. مقارنة بين تكلفة التركيب الكامل للطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق في عام 2016م وعام 2030م، بناءً على الانخفاضات المتوقعة في تكاليف مكوّنات النظام الكهروضوئي وصيانته بالإضافة إلى عمر أطول للوحة الكهروضوئية.
المصدر: DOE (2016).

وكما أشرت أنا وزميلي شايل كان، فإن المشكلة تكمن في أنّه حتى خفض تكاليف الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى النصف ربما لن يكون كافيًا. وهذا من شأنه أن يترك تكلفة الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية ضعف المستوى المطلوب تقريبًا لتجاوز انكماش القيمة، ما يقلّل بشكل حادّ من القيمة الاقتصادية لكلّ كيلوواط/ساعة إضافي من كهرباء الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع اتصال المزيد منها بالشبكة44.

يؤكد بعض المراقبين أنّ استبدال الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون ببعض المواد الأخرى لن يحلّ مشكلة تخفيض قيمة العملة؛ وذلك لأنّ اللوحة لا تمثّل سوى جزء بسيط من تكاليف تركيب الألواح الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق. وفي الواقع، وكما ذكرت مبادرة الطاقة التي أطلقها معهد ماساتشوستس للتقنية، "إنّ تقليل تكلفة [الألواح الشمسية] بمقدار النصف يقلّل فقط من التكاليف المقدرة بقرابة 15٪ لمشاريع نطاق المرافق التي نقوم بتحليلها، و9٪ للمشاريع السكنية." كما خلص تقرير المبادرة إلى أنّ محاولة تحسين كفاءة الألواح الشمسية بما يتجاوز 15 بالمئة هي مجرد هدر للجهد45.

لكن مراقبين آخرون يختلفون مع هذا الرأي بشدّة؛ إذ يجادل مارتن جرين- الذي في الواقع، كما تتذكرون، توقّع هيمنة السليكون الشمسي عندما كانت هذه وجهة نظر منعزلة للغاية- بأنّ الكفاءات الأعلى يمكن أن تحدث فرقًا كبيرًا في آفاق الطاقة الشمسية على المدى الطويل.46 ويتوقّع أن تحاول الصناعة على المدى القريب تعظيم كفاءة الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون، باستخدام تصميم ابتكره في أستراليا منذ عقود. ولكن الشركات التي يمكنها زيادة الكفاءة بدرجة أكبر في المستقبل؛ مثلًا، باستخدام خلايا البيروفسكايت والسيليكون أو حتى خلايا البيروفسكايت والبيروفسكايت الترادفية، ستتمتع بميزة كبيرة. وبالإضافة إلى خفض تكاليف الألواح، تمكّن كفاءات الألواح الأعلى التركيبات الشمسية من ضخّ المزيد من الطاقة باستخدام عدد أقل من الألواح، فضلًا عن أنّ الحاجة إلى عدد أقلّ من اللوحات تقلّل من تكاليف الأرض والعمالة والمعدات لمشروع الطاقة الشمسية. تنطبق هذه الحسابات على التطبيقات على نطاق المرافق، وهي أكثر أهمّية للتركيبات على أسطح المنازل ذات المساحات المحدودة، التي تضع أعلى سعر للمساحة.

الكفاءات العالية ليست الميزة الوحيدة التي تقدّمها التقنيات الجديدة؛ فتحطيم النموذج الحالي لتلك الألواح الثقيلة والصلبة، سيؤدي إلى توسيع نطاق جاذبية الطاقة الشمسية. في الماضي، كان على

القائمين على تركيبات الألواح الشمسية، وفي كثير من الأحيان، تفضيل الأداء على المرونة؛ حيث كانت الشرائح الرقيقة من السيليكون "غير المتبلور"، والمنخفضة التبلور، جيدة بما يكفي لتشغيل الآلات الحاسبة أو معدّات التخييم. ولكن ليس أكثر من ذلك، لأنّها كانت غير فعالة نهائيًّا. ولكن نظرًا إلى مرونتها وخفّة وزنها وكفاءتها العالية، فإنّ البيروفسكايت وغيره من التقنيات الناشئة يمكن أن توسّع استخدامات الطاقة الشمسية في الأسواق الحالية، وتشقّ طريقها إلى أسواق جديدة.

تشترك المواد الحديثة مثل البيروفسكايت، والمواد العضوية، والنقاط الكمّية جميعها في إمكانية طباعتها على ركائز مرنة بشكل جماعي، تمامًا مثل رزم الصحف التي تُخزَّن بوساطة طابعات كبيرة الحجم.وستؤدّي سهولة نقل لفائف الطاقة الشمسية إلى تقليل تكاليف الخدمات اللوجستية والشحن في الصناعة، وبعد ذلك، فإن القدرة على فتح الأغطية الشمسية في الصحراء، مع الحدّ الأدنى من المعدّات لتأمينها، يمكن أن تخفّض تكلفة الطاقة الشمسية على نطاق المرافق.

يمكن نشر المواد الشمسية المرنة التي توصّلت إليها المختبرات وتجربتها في بيئات جديدة ومختلفة من التضاريس؛ مثل مكبّ النفايات المتحوّلة أو سفوح التلال غير المستوية. ويمكن أن يكون الطلاء الشمسي في أسواق التوزيع أرخص بكثير وأكثر جمالية من الألواح الموجودة على الأسطح. ويمكن أيضًا دمج المواد الشمسية في المباني بطرق جديدة؛ فقد أعلنت شركة تسلا بالفعل عن ألواح سقف شمسية تخفي خلايا السيليكون بذكاء في موادّ التسقيف باهظة الثمن. لذلك، فإذا كانت تستطيع التحوّل إلى الكفاءات العالية إضافة إلى التنوّع المذهل للمواد الجديدة في المختبر، فقد تصنع منتجات أكثر جاذبية وبأسعار معقولة للسوق الشاملة.

قد تكون أول سوق جديدة للمواد المبتكرة هي الطاقة الشمسية على الأسطح بالنسبة إلى العالم النامي؛ حيث يعيش ما يقدّر بمليار شخص في العالم النامي في أحياء فقيرة داخل المدن، ويعيش معظمهم تحت أسطح أضعف من أن تدعم الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون الثقيل،47 وهي مصنوعة في أفضل الحالات من صفائح رقيقة من المعدن، ومن منسوجات واهية بالكاد توفّر مأوى في أسوأ الحالات. يفتقر معظم هؤلاء الأشخاص أيضًا إلى الطاقة الموثوقة. ولذلك فإنّ اللفّات المرنة والمطاطية للطلاء الشمسي عالي الكفاءة يمكن أن تُلبّي حاجات هؤلاء السكان الخاصّة، وربما حتى تُغذّي فائض الطاقة في الشبكة.48 والأهم من ذلك أنّ الباحثين في الأوساط الأكاديمية والصناعية سيحتاجون إلى تطوير مواد مانعة للتسرّب لحماية لفائف الطاقة الشمسية من الرطوبة والغبار والتآكل. وسيحتاجون أيضًا إلى تطوير طرق لتثبيت الألواح الكهروضوئية المرنة على الأسطح المؤقتة، وتوصيل الكابلات الكهربائية بشكل دائم. وهذا كلّه سيتطلّب ابتكارًا هندسيًّا يتجاوز مجرد ابتكار الموادّ الشمسية الأساسية الذي تسعى إليه المعامل الأكاديمية حاليًّا.

يمكّن لتعددية استخدامات التقنيات الجديدة أيضًا أن تمكّن من دمج الطاقة الشمسية ومواد البناء بطرق متنوّعة، ففي المناطق الحضرية المكتظة بالسكان، تكون مساحة الأسطح المخصّصة للألواح

الشمسية محدودة، لكن نوافذ ناطحات السحاب وواجهات المباني تتلقى الكثير من ضوء الشمس المباشر والمنتشر على مدار اليوم. وقد يؤدّي بخلاف ذلك إلى تسخين التصميمات الداخلية للمبنى، وزيادة الطلب على الطاقة لتشغيل مكيفات الهواء؛ لكنّ تحويل بعض ضوء الشمس هذا إلى طاقة يمكن أن يعوّض استخدام الطاقة في تبريد المبنى. وقد طوّر الباحثون في المختبر بالفعل خلايا بيروفسكايت شبه شفافة، تنتج الكهرباء بكفاءة 13 بالمئة، بينما تحافظ على 85 بالمئة من الحرارة التي تمرّ عبر النافذة في غياب الخلايا.49 ولأن المواد الجديدة يمكن أن تأخذ مجموعة من الألوان والشفافية، فإنّ الكهروضوئية المدمجة في البناء يمكن أن تعزّز طاولة رسم المهندس المعماري، بدلًا من تقييدها؛ كالزجاج المظلّل والمولّد للطاقة على سبيل المثال.

سيكون الجيش أيضًا عميلًا متحمّسًا لتقنيات الطاقة الشمسية الجديدة؛ ففي حين أنّ جالونًا من وقود الديزل قد يكلّف المستهلكين 3 دولارات في المضخّة، فإنه يكلف الجيش خمسة عشر ضعفًا في الميدان إن أخذنا في الحسبان تكلفة قوافل الوقود وحمايتها؛ إذ يستطيع الجيش، بدلًا من إعادة تزويد مولّدات الديزل بالوقود لتشغيل قاعدة في مكان ما، نقل لفات خفيفة الوزن من الفيلم الشمسي ونشرها ونصبها، وبذلك سيوفّر المال وربما الأرواح أيضًا.

لكن بالنسبة إليّ - مدمن الخيال العلمي - فإنّ أكثر الاحتمالات إثارة على الإطلاق هو خارج نطاق هذا العالم. تذكّر أنّ أقوى إشعاع شمسي موجود بالفعل في الفضاء الخارجي، قبل أن تمتصّ الجزيئات الموجودة في الغلاف الجوي للأرض جزءًا من الطاقة من ضوء الشمس. ومن الواضح أنه لا يوجد شيء اسمه الليل في الفضاء الخارجي؛ فالشمس تشرق على مدار الساعة وطوال أيام الأسبوع؛ لذلك هناك عشرة أضعاف الطاقة الشمسية التي يمكن تسخيرها خارج الغلاف الجوي للأرض مقارنة بالسطح، مع الأخذ في الحسبان انعدام الفصول أو الطقس أو ضوء النهار المتغيّر أو الخسائر الجوية.51 هل سيكون من الممكن بناء مزارع شمسية ضخمة في الفضاء الخارجي، وإرسال الطاقة بطريقة أو بأخرى إلى الأرض، ما يوفر كمّيّات هائلة من الطاقة على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع؟

حسنًا، هذه الفكرة ليست بعيدة المنال كما قد تتخيّل؛ فاليابان جادة للغاية في الواقع بشأن بناء قمر صناعي مداري للطاقة الشمسية؛ هدفها قيادة تحالف دولي لبناء قمر صناعي يمكنه ضخّ 1 جيجاوات -يزن أكثر من 10000 طن، ويبلغ عرضه عدّة كيلومترات- في ثلاثينيات القرن الحالي. وبقدر صعوبة إنشاء القمر الصناعي، تركز اليابان على التحدّي الأصعب المتمثّل في إعادة إرسال الطاقة إلى الأرض عبر إشعاع الميكروويف، الذي يمكن أن يتحوّل إلى كهرباء في محطة استقبال يبلغ ارتفاعها عدّة مئات من الأمتار عن الأرض. أما رئيس شركة تسلا إيلون ماسك Elon Musk فيرفض الفكرة بسبب فقدان الطاقة خلال عملية التحويل من ضوء الشمس إلى الطاقة، ومن ثم إلى موجات الميكرويف ومنها إلى الطاقة مرة أخرى. لكنّ وكالة الفضاء اليابانية تعتقد أن وفرة الطاقة على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع في الفضاء يمكن أن تعوّض تلك الخسائر52.

يمكن أن تقطع المواد الشمسية الجديدة شوطًا طويلًا نحو جعل قمر صناعي مداري يعمل بالطاقة الشمسية أمرًا قابلًا للتطبيق. ويمكن أن يكون إطلاق فيلم شمسي خفيف الوزن وعالي الكفاءة وقابلًا للطي أو التدحرج أسهل بكثير في الفضاء. بالإضافة إلى ابتكار الموادّ الشمسية، يوجد ما لا يقلّ عن خمس فئات أخرى من الابتكار لازمة لتحقيق رؤية الأقمار الصناعية للطاقة الشمسية، وهي تشمل: "نقل الطاقة اللاسلكية، والنقل الفضائي، وبناء الهياكل الكبيرة في المدار، واتجاهات الأقمار الصناعية والتحكّم في المدار... وإدارة الطاقة"53.

ربما يكون التعامل مع هذه التحدّيات جميعها في آنٍ معًا أمرًا شاقًّا للغاية لدرجة يصعب التغلب عليها، لا سيما بطريقة قليلة التكلفة، لكنّ الموقف الياباني هو الموقف الصحيح عندما يتعلّق الأمر بتخيّل مستقبل تقنية الطاقة الشمسية: يصبح التقدّم الملحوظ ممكنًا من خلال جذب الانتباه والموارد إلى الابتكار.

الإفلات من القيد

لسوء الطالع، فإنّ الصناعة بصورة عامة تنظر نظرة سوداوية نحو الابتكار؛ ففي الصناعات الأخرى؛ مثل صناعة أشباه الموصلات التي انحدرت منها الطاقة الشمسية، تنفق شركة إنتيل والشركات الكبيرة الأخرى بشكل روتيني ما يصل إلى 20 بالمئة من إيراداتها على البحث والتطوير. أما في مجال الطاقة الشمسية، فإن الإنفاق يصل من 4 - 7 بالمئة لشركة أمريكية مثل فيرست سولار، وقرابة 1 بالمئة للشركات الصينية. ومع أنّ تمويل الشركات الصينية والحكومية لابتكارات تقنية الطاقة الشمسية ارتفع في الآونة الأخيرة، لكنه لا يزال أقلّ بكثير من مستويات الإنفاق في الشركات الأمريكية54.

طالما احتفظت الصين بقبضتها الخانقة على صناعة الطاقة الشمسية، فمن غير المرجّح أن تتخلى الدولة عن تقنية السيليكون التي جعلت شركاتها في صدارة الصناعة العالمية. وفي الواقع يرى معظم العاملين في الصناعة أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون هي نقطة النهاية لنصف قرن من الابتكار. وتركز الصناعة الآن على خفض التكاليف بلا هوادة، من الإنتاج الأولي للبولي سيليكون إلى النشر النهائي للتركيبات القائمة على ألواح السيليكون. ولأنّ المصانع التي تصنع الألواح الشمسية، بما في ذلك المرافق والمعدّات اللازمة لإنتاج السيليكون عالي النقاء والخلايا الكهروضوئية، تتحمّل ثمنًا باهظًا، فإنّ الشركات تحجم عن تغيير المسار بمجرّد إغراقها بكمّيات كبيرة من رأس المال ووضعه على الطاولة55.

هذا الاتجاه يعرّض الصناعة لخطر معاناة التقييد التقني، ما يرسّخ هيمنة السيليكون الكهروضوئية. تشرح النظرية الاقتصادية للتقييد أنّ التقنية الحالية المهيمنة تحصل على ميزة مقابل التقنية الناشئة؛ فحتى لو كان بإمكان الشركات الناشئة أن تكون أقلّ تكلفة، وأن تؤدّي بشكل أفضل خلال مراحل التطوير وزيادة حجم الإنتاج، فقد تتعثّر التقنيات الناشئة في الأسواق الحرّة التي تفضل القادمين

الأوائل.56 بحلول عام 2030م يمكن أن تنخفض تكلفة الكهرباء من مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون إلى النصف، ما يجعل إزاحة السيليكون عن العرش أكثر صعوبة؛ فعلى الرغم من أنّ التقنيات المتفوّقة ستكون أرخص وأكثر كفاءة وأكثر تنوّعًا إذا تمّ تسويقها، فقد يقتصر العالم فقط على استخدام ألواح السيليكون الأفضل بشكل تدريجي. قد لا تكون هذه الألواح السيليكونية على قدر المستوى لهزيمة أكثر أشكال التقييد إشكالية؛ أي اعتماد العالم على الوقود الأحفوري.

هل يمكن أن يحدث التقييد الآن؟ لا توجد طريقة لمعرفة ذلك؛ فقد تنخفض تكلفة السيليكون بسرعة أكبر مما هو متوقع حاليًّا، وقد يتحوّل انكماش القيمة إلى ما هو أقلّ حدّة مما تتوقّعه أفضل عمليات المحاكاة اليوم. وإذا كان مصير الطاقة الشمسية بالفعل يتّجه للتقييد، فلن يتّضح ذلك إلا في وقت لاحق؛ فقد كانت هذه هي الحال بالنسبة إلى الطاقة النووية، وصار بالإمكان الآن الإشارة إلى القرار المصيري الذي أدّى إلى التقييد الكارثي.

اختار الأدميرال في البحرية الأمريكية هايمان ريكوفر Hyman Rickover بعد الحرب العالمية الثانية، أحد تصميمات المفاعلات النووية العديدة المحتملة التي كان يجري التحقيق فيها في ذلك الوقت، وهو مفاعل الماء الخفيف لتشغيل الغوّاصات الأمريكية. ولأنّ التصميم نجح، فقد اختير بعد ذلك مرّة أخرى لتشغيل حاملات الطائرات، ومحطات الطاقة النووية المدنية في النهاية.57 ولكنّ طريق التوسّع في التصميمات الأخرى للطاقة صار أمرًا صعبًا، فأكثر من 90 بالمئة من جميع المحطات النووية في جميع أنحاء العالم هي اليوم مفاعلات تعمل بالماء الخفيف؛ وذلك بسبب سياسات الولايات المتحدة الصارمة في مجال التصدير ومنع الانتشار في القرن العشرين. وإذا ما وضعنا جانبًا أنّ هذه المفاعلات يمكن أن تذوب، وتكون باهظة الثمن عند بنائها، أو أن العديد من التصميمات الأخرى التي تجاهلها الأدميرال ريكوفر قد تكون خيارات أفضل، إلا أنها مُعطّلة حتى الآن بسبب هيمنة مفاعل الماء الخفيف58.

تشير بعض الدلائل إلى أنّ الطاقة الشمسية يمكن أن تتجه نحو انغلاق يشبه التقييد النووي، حيث يُعدّ الانخفاض في أسعار الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون مفيدًا على المدى القصير، لكنّه على المدى الطويل يجعل اقتحام السوق صعبًا على التقنيات الناشئة التي قد لا تكون تنافسية من حيث التكلفة قبل أن تبدأ وفورات الحجم في الإنتاج الضخم.

علاوة على ذلك، يمكن أن يساعد الابتكار المالي الذي تمّت مناقشته في الفصلين 4 و5 في التخلص من هذا التقييد. فقد تتمكّن مشاريع الطاقة الشمسية من السيليكون من الاستفادة قريبًا من أسواق رأس المال العامة والوصول إلى التمويل الرخيص. ويعزى ذلك إلى وجود عقود من بيانات الأداء وضمانات الشركة المصنعة لمدّة ثلاثين عامًا؛ حيث ستضيف هذه القدرة ميزة تكلفة أخرى للسيليكون على المنافسين في مجال التقنية الناشئة، والتي لن يرغب المستثمرون العموميون في

المراهنة عليها، بعد أن شعروا بالراحة مع تقنية السيليكون. ونتيجة لذلك يمكن أن يكون الابتكار المالي بمثابة حاجز أمام الابتكار التقني بدلًا من أن يكون جسرًا للعبور.

يمكن أن تؤدّي السياسة العامة إلى تفاقم القيود أيضًا؛ ففي الحالة النووية، جعلت الهيئات التنظيمية النووية الأمريكية من الصعب جدًّا على الشركات نشر تصميمات مفاعلات جديدة، من خلال تطبيق القواعد التي خُصِّصت لمفاعلات الماء الخفيف. وفي مجال الطاقة الشمسية، فإنّ السياسات التي تبدو ظاهريًّا محايدة من الناحية التقنية، وتدعم جميع تقنيات الطاقة الشمسية في الواقع، تقلب بشكل غير مباشر ساحة اللعب ضد التقنيات الناشئة. على سبيل المثال، من المرجّح أن يستخدم المطوّرون الذين يبنون مشاريع الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة الإعفاءات الضريبية الفيدرالية لنشر السيليكون الكهروضوئي بدلًا من محاولة بناء مشاريع تعتمد على التقنيات الناشئة التي لم تنضج بعد. وتحتكر الطاقة الشمسية السيليكونية مهام الطاقة المتجدّدة على مستوى الولاية وذلك على حساب التقنيات الناشئة، وتعمل هذه السياسات أيضًا على توسيع ميزة السيليكون، وتجعل اقتحام السوق أمرًا صعبًا.

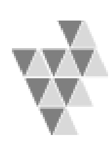
كما أنهم ينشئون مجموعات سياسية تحاول ترسيخ الجيل الأول من التقنية. في حالة السيليكون، خلّفت السياسات العامة مثل ائتمانات الضرائب الفيدرالية جيوشًا من جماعات الضغط التي تهدف إلى دعم توسيع هذه السياسات.59 لقد نجحوا في عام 2015م، عندما مدّد الكونجرس الإعفاءات الضريبية لكلّ من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ومن المؤكّد أنّ التحالفات السياسية التي تدعم الطاقة الشمسية الكهروضوئية السيليكونية وتقنيات الطاقة النظيفة الأخرى هي قوىً مهمّة للانتقال بعيدًا عن الوقود الأحفوري. ويعتقد بعض العلماء بأنّ هذه القوى قد يكونون اللاعبين الأساسيين للضغط على الحكومات وتمرير سياسات تسعير الكربون التي تتمتع بدعم واسع النطاق من الاقتصاديين.60 ولكن في الدعوة إلى التدخّلات السياسية الضيقة التي تدعم تقنيات الطاقة النظيفة الناضجة على التقنيات الناشئة، يمكن لهذه التحالفات أن تسهم أيضًا في تقييد التقنية.

سيحتاج التغلب على التقييد إلى مزيج من تدخّلات السياسة العامة وبراعة القطاع الخاص. كما أن التدخّل في السوق أمر صعب من الناحية الفنية والسياسية؛ فقط اسأل المسؤولين الذين أصدروا ضمان قرض لسوليندرا(******). سيتعمق الفصل العاشر، المتعلّق بتوصيات السياسة الأمريكية، في الطرق التي يمكن للحكومة من خلالها تقليل الحواجز التي تحول دون الابتكار بشكل أكثر فاعلية، وتشمل هذه زيادة الإنفاق على البحث والتطوير، وتمويل المشاريع الإيضاحية الميدانية الأولى من نوعها، وتسهيل استخدام الشركات الخاصّة لمرافق البحث العامة لتقليل تكاليف تطوير تقنيات جديدة.

لكنّها ستتخذ أيضًا مناهج مثل نموذج الأعمال لشركة هنري- أوكسفورد الكهروضوئية -Oxford PV، لإدخال تقنيات جديدة تدريجيًّا في صناعة الطاقة الشمسية؛ فنهج هنري -وضع طبقة من

البيروفسكايت فوق خلايا السيليكون الموجودة، مضيفًا خطوة ثانوية إلى عملية إنتاج غير مضطربة- هو تطوّر في طريقه إلى ثورة. ومن الممكن أن تنجح أكسفورد الكهروضوئية على المدى القريب، في جذب الشركات المصنعة للوحات الطاقة الشمسية الصينية لاستخدام تقنيتها وتعزيز كفاءة ألواح السيليكون بمقدار الثلث. ولكن بمجرد أن تكتسب الشركات خبرة في تصنيع طبقات البيروفسكايت على نطاق واسع، يمكنها بعد ذلك التفكير في تصنيع جميع الخلايا الشمسية من البيروفسكايت، ويمكن أن يكون هذا طريقًا تجاريًّا قابلًا للتطبيق نحو اللفات الشمسية عالية الكفاءة والمرنة وخفيفة الوزن والممتعة من الناحية الجمالية التي يحلم بها الأكاديميون.

آمل أن ينجح هنري بالفعل (في حال كنت تتساءل؛ ليس لديّ أيّ مصلحة مالية في مشروعه)، ولكن من المحتمل أن يتطلّب الأمر العديد من الشركات مثل شركته لتحسين احتمالات تقدّم التقنية التجارية. من حسن الطالع، لا يوجد شحّ في الأفكار العظيمة، ولكن من أجل الوصول إلى إمكاناتها الهائلة، سوف تتطلب الطاقة الشمسية الفوز بالدعم الذي تستحقه.



الفصل السابع تخزين أشعّة الشمس

وجدت شركة صناعة السيارات اليابانية (تويوتا) نفسها في أوائل عام 2012م، عند مفترق طرق. كانت الأمور تسير على ما يرام قبل عام، بعد أن باعت سيارات جديدة أكثر من أيّ منافس آخر. لكنّ كارثة محطة فوكوشيما النووية عام 2011م كانت بمثابة ضربة للأعمال التجارية، فقد ارتفعت أسعار الكهرباء لتشغيل مصانع الشركة بعد أن أغلقت اليابان أسطولها من المفاعلات النووية. ولم يستطع المورّدون المحلّيون تسليم قطع الغيار في الوقت المحدّد؛ وارتفع سعر الين، ما رفع أسعار صادرات تويوتا إلى باقي دول العالم. ونتيجة لذلك، انخفضت صافي أرباح الشركة بمقدار النصف، ولم تستطع الشركة عمل أي شيء بينما كانت شركة صناعة السيارات الأمريكية جنرال موتورز وشركة السيارات الألمانية فولكس فاجن تتقدم في المبيعات1.

يتذكر يوشيكازو تاناكا Yoshikazu Tanaka، أحد كبار مهندسي شركة تويوتا، بكل قلق: "سوف نتقرض إن لم يُتَّخذ أيّ إجراء". كان تاناكا في ذلك الوقت مسؤولًا عن سيارة تويوتا بريوس الهجينة الكهربائية، وهي نسخة مختلفة عن سيارة بريوس الأصلية؛ فقد كان بإمكانها قطع مسافات طويلة وهي التي أطلقت الثورة الهجينة. باعت تويوتا أكثر من مليون سيارة بريوس في كلّ من أسواق الولايات المتحدة واليابان، وأعطت سيارة تاناكا الهجينة المزوّدة بمكوّنات إضافية للعملاء خيارًا جديدًا لشحن الكهرباء في المنزل بالإضافة إلى التزود بالوقود بالبنزين في محطة وقود. وعلى الرغم من مشكلاتها الحالية، فلا تزال تويوتا تمتلك العلامة التجارية الأكثر مبيعًا في الصناعة، وكانت على وشك اتخاذ خطوة تالية كبيرة للاستفادة مما أحرزته من تقدّم.

من المفترض أن تكون هذه الخطوة هي إطلاق مركبة كهربائية بالكامل من دون خزان وقود، لكن يبدو أن السيارات الكهربائية هي طريق للمستقبل عالميًا إذ أعلن الرئيس الأمريكي باراك أوباما هدفًا رائعًا في عام 2008م: وضع مليون سيارة كهربائية على الطريق بحلول عام 2015م. وقد رفعت الصين الرهان في عام 2012م، وتعهّدت بتقديم 5 ملايين مركبة كهربائية بحلول عام 2020م، وأطلقت تسلا في العام نفسه سيارتها من طراز S سيدان بإشادة من النقاد، وكسرت مقياس تصنيفات مجلة تقارير المستهلك (Consumer Reports magazine) المعروفة. وهكذا، بدت السيارات الكهربائية وكأنها قد تكسر أخيرًا قبضة البترول الوقودَا المفضّل لسيارات الركاب.

تخيل مفاجأة تاناكا عندما كلّفه مجلس الإدارة بقيادة تصميم سيارة جديدة تمامًا وصديقة للبيئة لا يوجد فيها مكان لتخزين البترول، ولا يوجد أيضًا مكان لتوصيله بشبكة الطاقة أيضًا، وطلب إليه بدلًا من ذلك طرح سيارة تويوتا ميراي Toyota Mirai التي يعني اسمها حرفيًّا "المستقبل" باللغة اليابانية؛

حيث يُستعمل الهيدروجين وقودًا لها. وطُلب إليه أيضًا إنجاز المهمّة بميزانية محدودة؛ فبدأ تاناكا- وهو مهندس معتدل الخلق يرتدي نظارة طبّية وشعره يتراجع بلطف- في الجري لمسافة 5 كيلومترات في اليوم قبل الغداء مباشرة للتغلب على التوتر.

كان إيلون ماسك، مؤسّس شركة تيسلا، يسخر من رهان تويوتا على الهيدروجين، ويقول متهكّمًا: "إذا كنت ستختار آلية لمصدر الطاقة، فإنّ الهيدروجين سيكون غبيًّا بشكل لا يصدق". 2 ولكن عندما كشفت تويوتا عن ميراي بحلول عام 2015م، فقدت السيارات الكهربائية بعضًا من بريقها؛ فقد أدّى الانخفاض في أسعار النفط في عام 2014م من أعلى مستوى بأكثر من 100 دولار إلى أقلّ من 50 دولارًا للبرميل إلى زيادة طلب المستهلكين على الوقود وتقويض حالة المركبات الكهربائية، فتراجعت المركبات الكهربائية على الفور كنسبة من المركبات الجديدة؛ حيث انخفضت من 3.5 بالمئة إلى 2.9 بالمئة في الولايات المتحدة.3 لقد أخفقت الولايات المتحدة في تحقيق هدف الرئيس أوباما المتمثّل في تحقيق مليون سيارة كهربائية بنسبة هائلة بلغت 60 بالمئة. وكانت الصين أيضًا حتى عام 2017م في طريقها إلى عدم تحقيق هدفها لعام 2020 بشكل كبير، خاصةً بعد أن عزّزت دعم السيارات الكهربائية.4 لم تكن تويوتا وحدها التي تسعى إلى إعادة صياغة مسار بديل، بل كانت الحكومة اليابانية وراء صانع السيارات المنتخب؛ فقد أعلن رئيس الوزراء شينزو آبي في وقت لاحق أنّ "مجتمع الهيدروجين في المستقبل على وشك أن يبدأ هنا في اليابان"5.

بعدما استعادت تويوتا تاجها في عام 2015م بوصفها أكبر صانع سيارات في العالم، جادل تاناكا بأن ميراي كانت السليل المنطقي لبريوس بدلًا من السيارة الكهربائية. في الواقع لقد أعيد استخدام العديد من مكوّنات بريوس نفسها في ميراي، بما في ذلك محرّكها الكهربائي الذي كان يعمل باستخدام وقود الهيدروجين لتوليد الكهرباء.6 لكنّ الأهم من ذلك، أنّ ميراي احتفظت في تصميمها بميزة مهمّة أخذتها من سيارة بريوس، في حين تخلت عنها السيارات الكهربائية جميعها، وهي القدرة على التزوّد بالوقود (بالهيدروجين) في أقلّ من خمس دقائق؛ فبهذه الميزة تستطيع السيارة أن تقطع بخزان ممتلئ يبلغ 340 ميلًا. وهذا من شأنه أن يجعل امتلاك سيارة ميراي مشابهًا لامتلاك سيارة تقليدية تعمل بالبنزين. كانت تويوتا تراهن على أنّ معظم المستهلكين سيحجمون عن شراء سيارة كهربائية ذات نطاق محدود ووقت طويل لإعادة الشحن.

قد تكون تويوتا محقّة في أنّ المركبات الكهربائية قد تكون بطيئة في الإقلاع، ولا تنافس المركبات التقليدية من حيث الأداء، التي لها باع طويل في هذا مجال، فقد نمت المبيعات السنوية العالمية للمركبات التي تعمل بالوقود البترولي في عام 2016م إلى أكثر من 3 بالمئة، لتصل إلى ما يقرب من 90 مليونًا. 7 تستطيع إصدارات المركبات الكهربائية الجديدة السفر لأكثر من 200 ميل بشحنة واحدة، مثل سيارة بولت من شيفروليه Chevy Bolt ونموذج تسيلا Model 3، وهذا الأمر قد يزيد من معدّل اقتناء المركبات الكهربائية. ولا يزال هناك العديد من الموديلات الكهربائية بالكامل آتية في الطريق؛ حيث أعلنت فولفو في عام 2017م أنّها ستصنع سيارات كهربائية أو هجينة فقط

ابتداءً من عام 2019م. لكن السيارات الكهربائية ما زالت متأخرة عن المركبات التقليدية، حيث شكلت أقلّ من 1 بالمئة من إجمالي مبيعات السيارات في عام 2016م.

تحديات السوق التي تواجهها المركبات الكهربائية أكبر مما سبق ذكره؛ فإذا كان كوكب الأرض سيتخلص من الكربون، فلن تُنجز المهمّة فقط من خلال إزالة الوقود الأحفوري من توليد الكهرباء وتشغيل المركباتعلى الطرق بالكهرباء بدلًا من المشتقات النفطية. إن تلبية معظم حاجات الطاقة في العالم لا تتم بالكهرباء ولكن عن طريق حرق أنواع الوقود الأخرى، وأكثرها انتشارًا هو النفط؛ لذا فإنّ إزالة الكربون سيتطلب استبدال النفط، وهو مصدر الطاقة الأكثر استخدامًا على كوكب الأرض، بأنواع وقود قابلة للتخزين وليس لها بصمة كربونية.

ومع ذلك، يحظى النفط بشعبية كبيرة، خاصّة في قطاعي النقل والصناعة؛ لأنه والوقود المشتق منه مناسبان إلى حد كبير. على سبيل المثال، يخزّن البنزين ثمانين ضعفًا من الطاقة في الحجم نفسه الذي تحتله بطاريات الليثيوم أيون التي تشغّل الإلكترونيات والمركبات الكهربائية. في الواقع، يحتوي جالون واحد من البنزين على طاقة كافية لشحن جهاز آيفون كلّ يوم لمدّة 20 عامًا، ويكلّف نقل النفط حول العالم في ناقلات ضخمة بضعة سنتات إضافية فقط من تكلفة جالون البنزين هذا.

وعلاوة على ذلك، تعتمد العديد من أشكال النقل، بما في ذلك النقل بالشاحنات الثقيلة والشحن والطيران، على كثافة الطاقة العالية وإمكانية النقل وموثوقية الوقود الأحفوري. (في الواقع، عندما طافت طائرة تعمل بالطاقة الشمسية أخيرًا حول العالم لأول مرة على الإطلاق، استغرقت الرحلة أكثر من عام؛ لأن سوء الأحوال الجوية أبقى الطائرة على الأرض.8 إن التطبيقات التي لا يمكن شحنها بالكهرباء بسهولة، إن وجدت، فهي تمثّل 40 بالمئة من الطلب العالمي على طاقة النقل9.

تحديات الكهرباء لا تنتهي عند هذا الحدّ فحسب؛ حيث يعتمد استخدام الطاقة الصناعية العالمية، وهو ضعف استخدام النقل، ويمثل نصف الطلب العالمي على الطاقة، على الكهرباء بنسبة تقلّ عن 15 بالمئة من حاجاته، وغالبًا ما يكون حرق الوقود الأحفوري للتدفئة وتشغيل العمليات الصناعية أرخص من دفع ثمن الكهرباء لتوليد الحرارة نفسها10.

إذا كانت الكهرباء لا تخدم سوى جزء قليل من حاجات الطاقة في العالم، فكيف يمكن للبشرية تسخير طاقة الشمس لتوفيرمعظم حاجاتها من الطاقة في وقت ما من هذا القرن؟ لا يمكن للابتكار المالي والتقني السريع في مجال الخلايا الشمسية الكهروضوئية وحده حلّ هذا المأزق. بالإضافة إلى ذلك، هناك حاجة إلى الابتكار لتطوير وتسويق تقنيات بديلة لتخزين أشعّة الشمس عن طريق تحويلها إلى مخازن ملائمة للطاقة يمكن استخدامها في الأوقات التي لا تستطيع الألواح الكهروضوئية إنتاج الطاقة فيها.

يُعدّ إنتاج وقود الهيدروجين من ضوء الشمس أحد تلك التقنيات، ومركبة تويوتا ميراي هي مجرّد قمّة جبل الجليد عندما يتعلق الأمر بإمكانية استبدال الهيدروجين بالوقود الأحفوري؛ فبالإضافة إلى تزويد السيارات بالوقود يمكن للهيدروجين أن يوفّر الوقود للشاحنات والحرارة للاستخدامات الصناعية. وسيحلّ الهيدروجين المنتج بالطاقة الشمسية تلك المشكلة المزعجة المتمثلة في ضوء الشمس المتقطع، حيث يعمل بوصفه مخزنًا للطاقة يمكن استخدامه عند الطلب، على عكس الطاقة الشمسية الكهروضوئية، التي تنتج الطاقة فقط عندما تكون الشمس مشرقة.

لقد وجد العلماء الذين يبحثون عن مصدر إلهام لتحويل ضوء الشمس إلى وقود في كلّ مكان حولهم؛ فقد وجدوه في النباتات التي تسخّر الطاقة الشمسية لإنتاج الوقود من خلال عملية التمثيل الضوئي، وهي عملية تتضمّن تقسيم الماء لصنع الهيدروجين. إلّا أنّ النباتات نموذج غير كامل؛ لأنّ التمثيل الضوئي هو طريقة غير فعّالة جدًّا في تحويل الطاقة، ولذلك قام العلماء بنسخ بعض المبادئ الأساسية، وتخلّوا عن العديد من التفاصيل في محاولة لإنتاج ورقة اصطناعية تستغلّ ضوء الشمس لتوليد وقود الهيدروجين من الماء. وقد طوّر الباحثون في عام 2015م نموذجًا أوليًّا لجهاز ينتج الهيدروجين بكفاءة يعتدّ بها، وقد تكون بتكلفة منخفضة بمجرد تحسين هذه التقنية ووصولها إلى نطاق التصنيع. وبالقدر نفسه من الأهمّية، لم يتحطم الجهاز على الفور ولم ينفجر. وعلى الرغم من أنّ هذا الاختراع لا يزال يواجه كثيرًا من التحدّيات على طريق التسويق، فإنّه علامة مشجّعة على التقدّم.

ومع ذلك، فإن الهيدروجين بعيد كلّ البعد عن أن يكون بديلًا للنفط؛ ففي عالم السيارات -مثلًا- لن يتحوّل المستهلكون إلى مركبات الهيدروجين بشكل جماعي ما لم يكن لديهم وصول ملائم إلى محطات التزوّد بالوقود (الهيدروجين)، وهي غير موجودة بعد. وحتى إذا كانت المحطات موجودة بالفعل، فسيلزم ذلك توليد إمدادات الهيدروجين الرخيصة، ونقلها على نطاق ينافس قطاع البترول الهائل اليوم. وإدراكًا لهذه الحقيقة، فإنّ تويوتا تتحوّط في رهاناتها؛ حيث أعلنت في عام 2017م أنها تأمل في غضون خمس سنوات في تسويق نوع جديد من البطاريات (يُعرف باسم "بطارية الحالة الجافة بالكاملstate battery-solid-all")، التي من شأنها تمكين المركبة الكهربائية من الشحن في بضع دقائق، والسفر لمسافة أبعد مما يمكن للمركبات الكهربائية في الشحنة ألواحدة11.

في ضوء عيوب الهيدروجين، شرع العلماء في مسعىً أكثر جدّية: تحويل أشعّة الشمس بشكل فعّال من حيث التكلفة إلى وقود سائل يمكن أن يكون بديلًا جيدًا للوقود الأحفوري اليوم. وإذا كانت هذه العملية ستستخدم خام ثاني أكسيد الكربون المنبعث من عوادم محطة توليد الكهرباء، أو حتى من الغلاف الجوي، كمُدخَل، فإن حرق الوقود المُخرَج لإنتاج الطاقة سيكون متعادلًا من حيث الأثر الكربوني. لكنّ العمليات الكيميائية المستخدمة في إنتاج أنواع الوقود الملائمة والقائمة على الكربون أكثر تعقيدًا بكثير من العملية البسيطة نسبيًا لفصل جزيئي الماء لإنتاج الهيدروجين. لكن ذلك لم يثنِ

الباحثين عن الاستمرار؛ فقد حقّقوا إنجازًا علميًّا في عام 2016م، عندما استطاعوا تسخير عمليات الأيض المعقّدة للبكتيريا للقيام بالعمل الشاق وإنتاج وقود قابل للاستخدام.

ستتمكّن تقنيات تحويل ضوء الشمس إلى وقود ذات يوم من تخزين طاقة شمسية متقطعة، وهو أمر لا تستطيع الطاقة الشمسية الكهروضوئية القيام به. وهناك طريقة أخرى لكسر حاجز التخزين وهي تحويل طاقة الشمس إلى حرارة قابلة للتخزين، إذ تستطيع -بالفعل- بعض محطات الطاقة الشمسية المركزة concentrated solar power (CSP) الموجودة في السوق تخزين الطاقة طوال الليل، وتوليد الكهرباء بعد ساعات من غروب الشمس. ومع ذلك توقّف نمو الطاقة الشمسية المركزة بسبب تكلفتها العالية مقارنةً بالطاقة الشمسية الكهروضوئية. ويحاول الباحثون لتقليل تكلفة محطات الطاقة الشمسية المركزة المجهزة بالتخزين، تركيز ضوء الشمس لتحقيق درجات حرارة عالية لم يكن من الممكن الوصول إليها من قبل. وإذا ما نجحوا في ذلك، فيمكن أن تؤدّي الكفاءة الأكبر إلى جانب التخزين الحراري الرخيص والطويل الأمد إلى زيادة أرباح هذه المحطات، وتمكينها من تثبيت شبكة الكهرباء استجابةً لانتشار الطاقة الكهروضوئية المتزايد، وتخزين الطاقة الزائدة المنتجة في الأوقات المشمسة من اليوم، وإتاحتها عند الحاجة لاحقًا.

يتطلب الوصول إلى إمكانات الطاقة الشمسية الحقيقيةحدوث تقدّم نوعيّ ملحوظ في التقنيات الأخرى غير الكهروضوئية كلها، بما في ذلك الوقود المولّد بالطاقة الشمسية ومحطات الطاقة الشمسية المركزة التي تولد الكهرباء على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع. إن من غير المقبول تأجيل رصد الاستثمارات المطلوبة حتى تظهر الحاجة الملحّة لها؛ فقد يستغرق تطوير التقنية عقودًا، وحتى إنّ ضخّ أموال ضخمة في الابتكار في اللحظة الأخيرة سيؤدّي إلى ضغط هذه الجداول الزمنية ومن ثم إحراز تقدّم محدود. لذلك، فمن خلال التخطيط طويل الأجل، والاستعداد لتحمّل التكاليف مقدّمًا، تستطيع الدول في جميع أنحاء العالم جني الثمار الهائلة للابتكار مستقبلًا.

من جانبها، من المحتمل أن شركة تويوتا تتمنى الآن أن تخرج الورقة الاصطناعية من طاولة المختبر وتدخل النطاق التجاري. وبصرف النظر عن الرهان الكبير على الهيدروجين، فقد تعهّدت شركة صناعة السيارات بخفض الانبعاثات من سياراتها في عام 2050م بنسبة 90 بالمئة. ومن دون طريقة لتوليد الهيدروجين أو الوقود السائل من مصدر نظيف مثل ضوء الشمس، فإنّ سيارة ميراي (المستقبل) المعلن عنها عديمة الانبعاثات ستكون مجرد سراب.

لا حشرات، لا أسلاك

كنت متوترًا قليلًا في رحلتي إلى لوس أنجلوس؛ فهذه هي المرة الأولى التي أستضيف فيها عالمًا أكاديميًّا لمخاطبة أعضاء مجلس العلاقات الخارجية. ولكي أكون صادقًا تمامًا، أخشى أن يشعر

ضيفي وكأنه سمكة خارج الماء في أثناء العشاء، محاطًا بمجموعة عالمية من المديرين التنفيذيين والسفراء السابقين.

يجب ألّا أقلق؛ فقد كان ضيفي ناثان "نيت" لويس Nathan "Nate" Lewis؛ الأستاذ في معهد كاليفورنيا للتقنية (California Institute of Technology (Caltech، وهو نادر بين العلماء لقدرته على تلخيص المفاهيم المعقّدة في مقاطع صوتية لا تُنسى، وسرده المقنع والمنسوج ليعيد إلى أذهاننا أهمّية تنوّع خيوط البحث المتعدّدة. بدأ "نيت" ملاحظاته حول مستقبل الطاقة الشمسية بهذه العبارة الحادّة: "لا تستطيع التخزين؟ لا كهرباء بعد الساعة الرابعة Can't store? No power after four ". وجادل بقوة أنّ هذا الفشل يجعل من الضروري تطوير تقنيات قادرة على تخزين طاقة الشمس في وقود يمكن استخدامه عند الحاجة. أما حلّه المفضّلفمولد وقود شمسي متكامل، وهو جهاز أنيق يأخذ الماء وضوء الشمس، ويبثّ الهيدروجين الغازي والأكسجين. سيكون الأمر بهذه البساطة، طمأن نيت الحاضرين المذهلين: "لا حشرات، لا أسلاك
No bugs, no wires".

قصد "نيت" بذلك أن يتجنّب جهازه كلّ فوضى الأنظمة البيولوجية الحقيقية ("No bugs لا حشرات"). وسيتجنّب أيضًا المضاعفات والتكاليف التي تنشأ عند توصيل أجهزة منفصلة معًا قطعة قطعة لإنتاج وقود الهيدروجين. كانت رؤيته هي إنشاء مولد هيدروجين بسيط وأنيق يتفوّق على أفضل نباتات الطبيعة.

إن النباتات، على الرغم من كلّ نجاحها، هي في الواقع فظيعة في تحويل ضوء الشمس إلى طاقة؛ فحتى إذا كنت لا تعرف أيّ شيء عن كيفية عمل التمثيل الضوئي، فإن بإمكانك أن تستنتج من اللون الأخضر للأوراق أنّ تحويل الطاقة الفعّال تمامًا قد لا يكون من أولويات النبات (الأوراق الداكنة أفضل بكثير في امتصاص أشعّة الشمس). تعمل البلاستيدات الخضراء في خلايا الأوراق بشكل جيد بما يكفي لتلبية حاجات النبات، وهي تجري تفاعلات كيميائية معقّدة تغذّيها طاقة الشمس، وتحوّل ثاني أكسيد الكربون والماء إلى سكّريات لتخزين الطاقة اللازمة لأنشطة مثل البقاء والتكاثر. في النهاية، فإنّ أكثر النباتات كفاءة تحوّل بالكاد 1 بالمئة من ضوء الشمس الوارد إلى طاقة مخزنة.

ومع ذلك، فإنّ الغطاء النباتي يقدّم نموذجًا عامًّا لتحويل ضوء الشمس إلى وقود؛ إذ تقسّم النباتات الماء وتولّد الهيدروجين والأكسجين في وقت مبكر من عملية التمثيل الضوئي، فيذهب الأكسجين إلى الغلاف الجوّي، بينما يتغذّى الهيدروجين في التفاعلات الكيميائية اللاحقة. إنّ طريقة فصل جزيئي الماء التي تقوم بها النباتات تدعونا للتأمل؛ فالدرس الأول هو أنّهما يفصلان نصف تفاعلات إنتاج الأكسجين والهيدروجين بين منطقتين مختلفتين، تعرفان بالنظام الضوئي الأول والنظام الضوئي الثاني. لم يكن هذا النشوء قابلًا للاشتعال، فهذا التصميم يمنع الهيدروجين من الاحتراق تلقائيًّا في وجود الأكسجين. ثانيًا، يحتوي النظام الضوئي حيث يُمتص الضوء أيضًا على محفّزات

أو جزيئات تسرع نصف التفاعل. في الواقع، يمكننا أن نشكر محّفز المنجنيز الذي يسرّع إنتاج النبات لكلّ الأكسجين الموجود في الغلاف الجوي للأرض. ثالثًا، تفصل النباتات نصفي التفاعلات بغشاء لا يُبقي الهيدروجين والأكسجين منفصلين فحسب، بل يسمح أيضًا للأيونات المشحونة بالمرور عبره، وهو أمر مهمّ لتجنّب عدم توازن الشحنة الذي من شأنه أن يوقف نِصفيّ التفاعل.

يحتاج الباحثون الذين يطوّرون مولّدات تعمل بالوقود الشمسي أيضًا إلى تجميع خمسة مكوّنات: قطبان ضوئيان مغموران في الماء يمتصان الطاقة الضوئية لأداء كلّ نصف من نصفيّ التفاعل لفصل الماء، وعاملان محفّزان لتسريع كلّ واحد من نصفيّ، وغشاء يوقف هذا الجسم الغريب بأكمله من الانفجار. ويسمّى هذا الجسم "الخلية الكهروكيميائية الضوئية photoelectrochemical cell (PEC)".

لكنّ أوجه الشبه بينهما تنتهي هناك، ومثلما يحب "نيت" أن يقول؛ فبعد أخذ الإلهام من الطيور ذات الريش، تخلى البشر عن الريش واخترعوا طائرة البوينغ 747. وعلى عكس النباتات، من المحتمل ألا تستخدم الخلايا الكهروكيميائية الضوئية المستقبلية قطبان كهربائيّان ضوئيّان أخضران يتنافسان مع بعضهما بعضًا لامتصاص الجزء نفسه من طيف الشمس. وبدلًا من ذلك، على أحدها -المصعد (الأنود، القطب السالب)، الذي ينتج الأكسجين من الماء- أن يستخدم فوتونات عالية الطاقة، ما يسمح للفوتونات منخفضة الطاقة بالمرور من خلالها ليتم امتصاصها بوساطة القطب المهبط (الكاثود)، الذي ينتج الهيدروجين. يذكرنا هذا التصميم بالطريقة التي تعمل بها الخلايا الكهروضوئية الشمسية الترادفية التي تشتمل على طبقات متعدّدة من أشباه الموصلات، مثل البيروفسكايت ذي فجوة النطاق العالية والمكدّس فوق السيليكون ذي فجوة النطاق المنخفضة.

قد تتساءل: إذا كانت الخلية الكهروكيميائية الضوئية تشبه خلية الكهروضوئية الشمسية، فلماذا لا تستخدم الأخيرة في فصل المياه؟ في الواقع، تعدّ الألواح الكهروضوئية الشمسية أكثر تقدّمًا من الناحية التجارية، ويمكن لجهاز معروف جيدًا يسمّى "المحلل الكهربي electrolyzer " استخدام الكهرباء المولدة من الخلايا الكهروضوئية في فصل المياه وإنتاج الهيدروجين؛ فقد صارت الطاقة الكهروضوئية حقيقة واقعة على نطاق واسع، وكذلك المحلّل الكهربائي الذي استُخدِم لعقود في السدّ العالي بأسوان في مصر لتزويد الهيدروجين وإنتاج الأسمدة.12 نظرًا إلى الانخفاض السريع في تكلفة الخلايا الكهروضوئية، فقد يبدو ربط الألواح الكهروضوئية الشمسية بمحلّل كهربائي طريقة اقتصادية لإنتاج الهيدروجين اليوم، بدلًا من انتظار ورقة اصطناعية بعيدة المنال.

لكنّ هذا النهج من شأنه أن ينتهك شعار "نيت" المتمثّل في "لا أسلاك"، الذي يثق به لسبب وجيه. يكشف التحليل الاقتصادي أنّ نهج المحلّل الكهربائي والكهروضوئي سينتج هيدروجين يكلف أكثر من 10 دولارات للكيلوغرام (من حسن الطالع بالنسبة إلى بعضنا الذين اعتادوا على الحكم على سعر الوقود في المضخة، فإنّ جالون واحد من البنزين يكافئ تمامًا كيلوجرامًا واحدًا من

الهيدروجين من حيث محتوى الطاقة). وعلى النقيض من ذلك، فإنّ تكلفة إنتاج الهيدروجين باستخدام الغاز الطبيعي- وهي الطريقة الأكثر شيوعًا اليوم على الرغم من أنها ليست طريقة خالية من الانبعاثات- تبلغ قرابة سدس هذا الرقم. وبالتأكيد كان أهم هدف للتكلفة أن يكون السعر في مضخة الوقود أقلّ من 3 دولارات للجالون الواحد في الولايات المتحدة في عام 2017م13.

يُعدّ النهج الآخر مكلفًا للغاية؛ وذلك لأنه عندما تكون الشمس مشرقة، وتوفّر الألواح الكهروضوئية الشمسية ذروة إنتاجها من الكهرباء، فإنّ المحلل الكهربائي يعمل فقط ما يقارب 25 بالمئة من اليوم.ولذلك فإنّ سداد التكلفة الرأسمالية للمحلّل الكهربائي يستغرق أربعة أضعاف المدّة المطلوبة إذا كان يعمل بكامل طاقته طوال الوقت.وبالإضافة إلى ذلك يتطلّب المحلّل الكهربائي موادّ محفزة باهظة الثمن، في حين أنّ التصميم المتكامل المكوّن من طبقتين للخلية الكهروكيميائية الضوئية يحتاج إلى موادّ محفّزة رخيصة (بفضل حاجنه إلى كثافة تيار منخفض).

إن التغلب على تكلفة إنتاج الهيدروجين بالغاز الطبيعي، ناهيك عن تكلفة البنزين، سيستلزم استخدام مواد رخيصة للغاية وسهلة المنال لمكوّنات الخلية الكهروكيميائية الضوئية الخمسة الرئيسة جميعها. لكن هذا ليس كلّ ما يتعيّن فعله؛ فلتحقيق النجاح بشكل كبير، يجب ألّا تكون الموادّ رخيصة فحسب، بل يجب أن تكون أيضًا آمنة وقوية وفعّالة. ولسوء الطالع أنّ الباحثين حقّقوا ثلاثًا من هذه الخصائص الأربع التي تدخل في إنشاء الخلايا الكهروكيميائية الضوئية؛، ولكن يبدو أن إصلاح مشكلة ما يؤدّي إلى ظهور مشكلة أخرى.

ابدأ بالسلامة. لكي نمنع الهيدروجين والأكسجين من الاندماج والانفجار، تحتاج خلية كهروكيميائية ضوئية إلى غشاء يفصل بين تفاعلتي النصف، لكنّ أنصاف التفاعل الذي ينتج الأكسجين من الماء يحوّل الماء أيضًا إلى حمض، في حين أنّ أنصاف التفاعل الذي ينتج الهيدروجين يحوّله إلى ما يشبه الماء القاعدي؛ فالأحماض هي التي تهضم الطعام في المعدة، والقواعد تنظف الصرف. وإذا لم تكن السلامة مصدر قلق ويمكن التخلص من الغشاء، فإنّ المياه الحمضية والقاعدية ستعمل على تحييد بعضهما بعضًا، ولكن يتعيّن على العلماء مع وجود الغشاء في مكانه، إيجاد موادّ للأقطاب الكهروضوئية والمحفّزات التي لا تذوب أو تتآكل في الوسط الحمضي أو القاعدي. وهذا المطلب يستبعد وجود العديد من الموادّ الرخيصة التي لن تعيش في ظل مثل هذه الظروف.14 لذلك، فإنّ صنع خلية كهروكيميائية ضوئية من موادّ رخيصة، وتجهيزها بغشاء لضمان السلامة يمكن أن يؤدّي إلى فشلها في اختبار المتانة. وهذا ما يؤدي إلى ظهور مشكلة أخرى!

بعد ذلك، ضع في الحسبان كفاءة خلية كهروكيميائية ضوئية، وهو مقدار طاقة الشمس التي يحوّلها الجهاز إلى طاقة مخزّنة في صورة هيدروجين؛ حيث تعتمد الكفاءة على مدى جودة امتصاص الأقطاب الكهروضوئية بشكل جماعي لأشعّة الشمس، ومدى سرعة تفاعل النصفين في فصل الماء، فمن خلال فجوات الطاقة والمحفزات الكهروضوئية المختارة بعناية، يمكن أن تحقّق خلية

كهروكيميائية ضوئية من الناحية النظرية أكثر من 30 بالمئة من الكفاءة.15 إن أشباه الموصلات باهظة الثمن تقدّم مجموعة متنوّعة من فجوات الطاقة للاختيار من بينها، بينما تقدّم الموادّ الرخيصة، خاصّة تلك التي لديها فجوة طاقة عالية، قائمة محدودة للغاية. وبالمثل، تُعدّ محفزات المعادن الثمينة مثل البلاتين فعّالة في تسريع التفاعلات، لكنها نادرة ومكلفة. لذا مرة أخرى، يؤدّي سدّ أي ثقب فعّال إلى مشكلة أخرى؛ حيث تطفو على السطح تكلفة عالية.

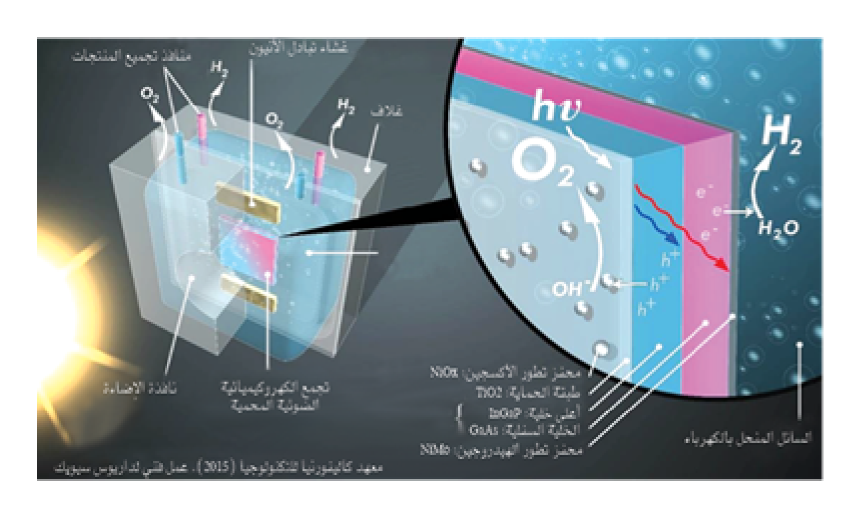
لذلك، أدرك "نيت" أنه سيتعيّن عليه أيضًا ترقية ترسانته البحثية (من الناحية المثالية مع نتائج أفضل). وبصفته المدير المؤسس للمركز المشترك للتمثيل الضوئي الاصطناعي، (Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)) في وزارة الطاقة الأمريكية، أراد "نيت" تغيير الطريقة التي تتبعها الحكومة الفيدرالية في البحث. ولذلك دعا المركز مجموعة من العلماء في مختلف التخصّصات، ونسّق جهودهم نحو الهدف الأهم، وهو إنشاء مولد وقود شمسي متكامل آمن وفعّال وقوي ورخيص الثمن.16 وشكل أيضًا قوة حاسوبية هائلة لمواجهة مشكلة العثور على المواد التي يمكن أن تلبي جميع المعايير الأربعة المذكورة سلفًا، والمحاكاة المنهجية لآلاف المركّبات وإجراء الاختبارات داخل المختبر على المركّبات التي قد تكون واعدة.17 وقد قلبت هذه الإستراتيجية العلم التقليدي رأسًا على عقب؛ فبدلًا من غربلة الموادّ الموجودة بشقّ الأنفس على أمل العثور على واحدة تناسب التطبيق، بدأ نموذج المواد حسب التصميم هذا من الهدف النهائي، وعمل إلى الوراء لإنشاء المواد المناسبة.

لقد أثّر الحدس العلمي القديم الجيد أيضًا بصورة مهمّة في عملية البحث مع القليل من الحظ. وهنا يبرز مثالان؛ أولهما، وجدت مجموعة "نيت"، مع متعاونين في جامعة ولاية بنسلفانيا، الإلهام في المحفزات المستخدمة في مصافي النفط لعزل الكبريت الملوّث للهواء من المنتجات البترولية، وهذه المحفّزات رخيصة الثمن، وتستخدم عناصر وفيرة، وهي رائعة في تسريع أنصاف التفاعل الذي ينتج الهيدروجين. 18،19 (لسوء الطالع، لا يزال الباحثون يبحثون عن محفّز رخيص وفعّال لنصف التفاعل المنتج للأكسجين).

أما في المثال الثاني، فقام الباحثون في مختبر "نيت" بطلاء عيّناتهم بطبقة رقيقة من ثاني أكسيد التيتانيوم عن طريق الخطأ، ووجدوا نتيجة مفاجئة؛ فثاني أكسيد التيتانيوم هو العنصر الرئيس في مستحضر الوقاية من الشمس؛ لذلك قد يتوقّع المرء أنه يمنع أشعّة الشمس. إلّا أن هذا الطلاء الرقيق للغاية -بدلًا من ذلك- يسمح للضوء بالدخول مع حماية الأقطاب الكهروضوئية والمحفّزات من التآكل بفعل المحلول الأساسي (الذي يُعدّ مادة مسببة للتآكل مثل منظف مجارى التصريف كما مرّ سابقًا)20.

الأفكار المستعارة من صناعة النفط، واكتشاف "نيت" للواقي الشمسي بالصدفة، وفرق البحث للمركز المشترك للتمثيل الضوئي الاصطناعي، كلّها أسباب جعلت تحقيق هذا الإنجاز ممكنا؛ فقد

أعلن المركز في عام 2015م عن مولد وقود شمسي متكامل، يستطيع تحويل ضوء الشمس إلى وقود هيدروجين بكفاءة تزيد على 10 بالمئة.21، لكن هذا الإنجاز في حدّ ذاته يُعدّ ضئيلًا من حيث الكفاءة؛ حيث وصل آخرون إلى 22 بالمئة لكفاءة خلية كهروكيميائية ضوئية،22 لكنّ جهاز المركز استخدم محفّزات رخيصة ومتوافرة بكثرة في الأرض، وكان قادرًا على ضخّ الهيدروجين على مدار يومين من التشغيل المستمر (الشكل 7.1). وكدليل على المفهوم، فقد أثارت التجربة إمكانية وجود منتج مجدٍ تجاريًّا في المستقبل.



الشكل (7.1): رسم تخطيطي لنموذج المركز الأولي لخلية كهروكيميائية ضوئية بفاعلية 10 بالمئة. يعرض هذا الرسم التوضيحي بنية مولد الوقود الشمسي المتكامل الذي يستخدم ضوء الشمس في فصل الماء إلى هيدروجين وأكسجين، واللذين يتم جمعهما من منافذ على جوانب متقابلة من الغشاء الذي يحافظ على انفصال تفاعلات النصفين. تحدث هذه التفاعلات في قلب الجهاز، عند القطبين الكهروضوئيين، وكلّ منهما مغطىً بمحفّز يعمل على تسريع نصف التفاعل ذي الصلة.

المصدر: أعيد طبعها بإذن من California Institute of Technology.

تظلّ العديد من حاجات البحث دون معالجة. على سبيل المثال، استخدم جهاز المركز أشباه موصلات باهظة الثمن للأقطاب الكهروضوئية المستعارة من الخلايا الكهروضوئية الشمسية حاملة الرقم القياسي سابقًا. وقد تكون الخطوة التالية هي مواصلة إحراز التقدّم في مجال التشغيل الكهروضوئي، واستخدام البيروفسكايت بوصفها ماصّات للضوء رخيصة وفعّالة، وقد وصلت بالفعل كفاءة الخلايا الكهروكيميائية الضوئية والقائمة على البيروفسكايت إلى أكثر من 12 بالمئة23. ما أنّ الهياكل الترادفية المصنوعة من مادة البيروفسكايت/السيليكون، التي تُعِدّ المتسابقين الأوائل للجيل الثاني من الألواح الكهروضوئية الشمسية، قد تفتح أيضًا الطريق نحو 20٪ من الخلايا الكهروضوئية الشمسية الفعّالة وما بعدها. 24

إذن، عندما تتحول هذه التقنية إلى منتج تجاري، فمن غير المرجح أن تبدو على شكل أوراق الشجر التي ألهمتها. يتصوّر "نيت" غطاءً يُفرَش على مساحة شاسعة لامتصاص أشعّة الشمس، مع أنابيب

تصريف لتجميع الهيدروجين الذي تنتجه، وهذا بعيد كلّ البعد عن النموذج الأولي الذي ابتكره مركز (جاكب)، والذي يبلغ طوله 1 سم 2، ولكن عندما نستمع إلى رؤية "نيت"، فإننا نعتقد أن ليس من الصعب أن لا تحلم أحلامًا كبيرة.

الإنجاز الأعظم

على الطرف الآخر من أمريكا، يوجد عالم آخر مشهور يسعى أيضًا لتسويق ورقة اصطناعية. مثل ناثان لويس، يجمع دان نوسيرا Dan Nocera من جامعة هارفارد ببراعة بين العلم والتواصل الفعّال، والعمل الإضافي؛ فهو عالم مشهور مثل شهرة الفلكي الأمريكي كارل ساجان Carl Sagan ولكن في مجال الوقود الشمسي. لديه موهبة في التواصل مع جماهير متنوّعة بدءًا من التجمّعات العلمية للجمعية الفيزيائية الأمريكية، حتى مؤتمرات القمّة التي يعقدها معهد آسبن؛ فإذا كان جمهوره يتناول شريحة لحم، فسوف يقوم بتسخينهم بالسؤال: "ما الذي مضغته للتو؟ الشمس! كان اللحم البقري مجرد طاقة أشعّة الشمس"25.

استحوذ نوسيرا على العالم في عام 2011م بإعلانه أنه اخترع الورقة الاصطناعية. كان العرض المفضل لديه هو وضع الجهاز الذي بدا وكأنه طابع بريد داكن، في كوب من الماء. بدأ في تلك المرحلة بتكوين فقاعات الهيدروجين والأكسجين على كلا الجانبين (على الرغم من تحويل نسبة ضئيلة فقط من الطاقة الشمسية الواردة إلى هيدروجين).26 على الرغم من بساطتها، كانت الورقة الاصطناعية تتويجًا لعمل ثلاثين عامًا الذي كرّس حياته لأجله. منذ أن كان طالب دراسات عليا في معهد كاليفورنيا للتقنية، وبعد أن حقّق هذا الاختراق، شرع نوسيرا في طرح هذه التقنية الجديدة في السوق.

لسوء الطالع، كان على وشك تعلّم الدرس الذي تعلّمته تقريبًا كلّ شركة ناشئة تعمل في مجال الطاقة النظيفة في وادي السيليكون: الجزء الصعب حقًّا يأتي بعد تحقيق أيّ اكتشاف مثير داخل المختبر. وكان في وقت لاحق يندب: "لقد قمت بعمل الإنجاز الأعظم في مجال العلم. رائع! هذا لا يعني أنني قمت بالعمل المستحيل في التقنية، وهذا ما لا يحصل عليه العلماء والأساتذة".27 شركته الناشئة؛ صن كتاليتكس Sun Catalytix، انتهى بها الأمر إلى الابتعاد عن الوقود الشمسي لتطوير بطاريات تخزين لشبكة الطاقة بدلًا من ذلك (اشترت شركة لوكهيد Lockheed الشركة مقابل مبلغ لم يكشف عنه في عام 2014م).

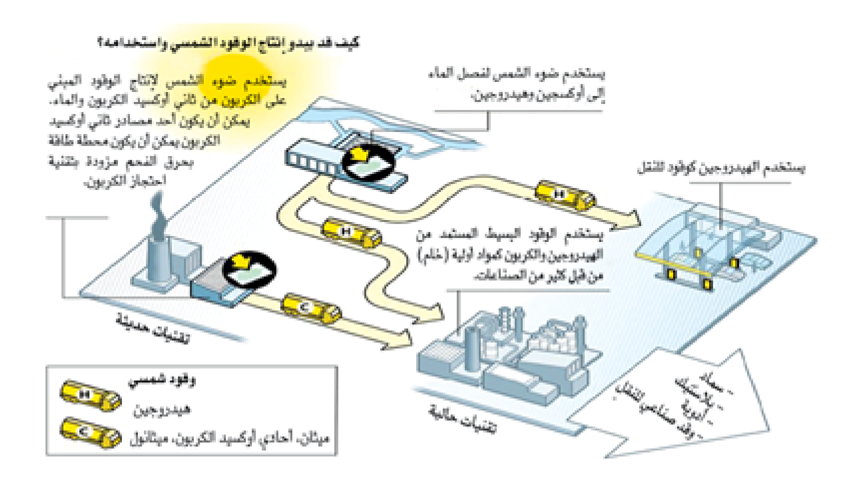
لكن التجربة لم تمنعه من مطاردة الإنجاز الأعظم، فقد توجه نوسيرا منذ ذلك الحين إلى مطاردة هدف أكثر صعوبة: تسخير ضوء الشمس والماء وثاني أكسيد الكربون لإنتاج وقود سائل قائم على الكربون يمكن أن يكون بديلًا للمنتجات البترولية. إن الفوائد المتوقّعة لمثل هذه التقنية قد تكون مقنعة؛ إذ يحتوي الوقود السائل بالفعل على شبكات بُنية تحتية عالمية هائلة، بما في ذلك مرافق

التخزين وخطوط الأنابيب العابرة للقارات وناقلات النفط العملاقة، ناهيك عن محطات التعبئة المنتشرة في جميع أنحاء العالم، ومن الممكن أن يعتمد الجهاز الذي يمكن أن يحوّل ضوء الشمس إلى وقود مستخدَم بشكل شائع على تلك البنية التحتية.

إنّ أكثر الطرق الواعدة لصنع الوقود القائم على الكربون من ضوء الشمس تتمحور في الوقت الحالي حول الهيدروجين المولّد من الشمس بوصفه وسيطًا؛ فالهيدروجين هو أسهل وقود يُنتَج من ضوء الشمس، على الرغم من أنّ القيام بذلك لا يزال معقدًا بشكل عجيب، وبإمكان العمليات الصناعية المفهومة جيدًا دمج الهيدروجين مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج مجموعة من أنواع الوقود المفيدة المعروفة باسم الهيدروكربونات28.

ومع ذلك، فإن التحدّي الصعب هو الحاجة إلى الحصول على ثاني أكسيد الكربون النقي للاندماج مع الهيدروجين لإنتاج الوقود الهيدروكربوني. لكن الجانب الآخر من هذا التحدّي هو فرصة: أنّ إنتاج الوقود القائم على الكربون يمكن أن يستهلك ثاني أكسيد الكربون المنبعث من محطات توليد الطاقة بالفحم والغاز الطبيعي، بالإضافة إلى المرافق الصناعية مثل مصافي النفط ومصانع الأسمنت، التي لولا ذلك يمكن أن تتسرّب إلى الغلاف الجوي وتُسهم في الاحتباس الحراري. لكنّ الحصول على ثاني أكسيد الكربون النقي بطريقة فعّالة من حيث التكلفة أمر صعب، خاصّة وأنّ العادم من محطات الوقود الأحفوري يحتوي على مزيج كامل من الغازات البغيضة التي يجب فصلها؛ حيث توجد تقنيات مختلفة لأداء هذه المهمّة، من معالجة العادم بمحلول ينتزع بشكل انتقائي جزيئات ثاني أكسيد الكربون، أو حتى استخدام غشاء يفصل الغازات المختلفة. لكنّها مكلفة جميعها في الوقت الحالي، ويمكن أن تكون لها آثار جانبية أخرى، مثل تقليل كفاءة محطة توليد الكهرباء29.

إذا تمكّن العلماء من حلّ المشكلات المزدوجة المتمثّلة في توليد الهيدروجين بطريقة فعّالة من حيث التكلفة من أشعّة الشمس، والتقاط ثاني أكسيد الكربون من محطات الوقود الأحفوري، فإنّ مجموعة متنوّعة من الوقود الشمسي ستكون في متناول اليد. يتصوّر الشكل (7.2) الوقود الشمسي الذي يحلّ محلّ البترول في مختلف القطاعات، بدءًا من تشغيل المركبات إلى إنتاج البلاستيك، حيث يمكن استخدام الهيدروجين المولّد بالطاقة الشمسية مباشرةً بوصفه وقودًا للنقل في المركبات مثل سيارة تويوتا ميراي. أو يمكن دمجه مع ثاني أكسيد الكربون في منشأة قد يطلق عليها "مصفاة الطاقة الشمسية"، لإنشاء مجموعة الوقود الهيدروكربوني نفسها التي تُنتَج اليوم في مصافي النفط، ثم تُستخدم بعد ذلك في مجموعة من الصناعات وبوصفها وقودًا للنقل.



الشكل (7.2): رؤية لاقتصاد الهيدروجين.
المصدر: أعيد طبعها بإذن من Royal Society of Chemistry.

على الرغم من أنّ كلّ هذا يبدو مستقبليًا، إلا أن نوسيرا يريد أن يفعل شيئًا أكثر صعوبة؛ فهو يريد تجاوز إنتاج الهيدروجين واستخدام ضوء الشمس والماء وثاني أكسيد الكربون لإنتاج الوقود المحتوي على الكربون مباشرة. وإذا كان من الممكن إجراء هذه المناورة بشكل فعّال من حيث التكلفة وعلى نطاق واسع، فستكون الطريقة الأكثر فاعلية التي تُطلَق منفردة لتخزين ضوء الشمس في أكثر أنواع الوقود ملاءمةً المعروفة للبشرية.

من وجهة نظر علمية، تبدو هذه المهمّة شبه مستحيلة؛ فمجرّد فصل الماء لتوليد الهيدروجين والأكسجين أمر صعب بما فيه الكفاية، ويُعرف هذا النوع من التفاعل باسم "تفاعل أربعة إلكترونات"، حيث تغيّر أربعة إلكترونات مستويات الطاقة أو تنتقل من ذرة إلى أخرى. ولكن لإنشاء أبسط هيدروكربون -ميثان أحادي الكربون، الذي يكوّن الغاز الطبيعي- فيتطلب خلط ثمانية إلكترونات، وهو اقتراح أكثر تعقيدًا بكثير. سوف يتطلّب تسخير ضوء الشمس لتكوين وقود قائم على الكربون اكتشاف المزيد من المواد الجديدة لامتصاص الضوء وتحفيز التفاعلات الكيميائية30.

نتيجة لذلك، فإنّ التقنية التجارية لصنع الوقود القائم على الكربون مباشرة من الطاقة الشمسية هي أبعد بكثير من التقنية التي يمكن أن تنتج الهيدروجين. ومع ذلك تحقّقت مؤخّرًا بعض الإنجازات البحثية المثيرة؛ في مثال للتلاقح العلمي المتبادل. يعتمد أحد هذه الإنجازات على البيروفسكايت لتشغيل إنتاج الوقود المعتمد على الكربون من ضوء الشمس والماء وثاني أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أنّ هذا الجهاز حقّق كفاءة قياسية بلغت 6.5 بالمئة، فإنّه اعتمد على عناصر باهظة الثمن -الإيريديوم والذهب- لتحفيز التفاعلات الكيميائية السريعة31.

كان للبروفيسور بيدونغ يانغ Peidong Yang من جامعة كاليفورنيا في بيركلي فكرة مختلفة: استخدام البكتيريا بوصفها محفزات. كان يانغ يعلم أنّ الطبيعة تستخدم إنزيمات معقدة بوصفها محفّزات في عملية التمثيل الضوئي. وعلى الرغم من أنّ هذه الإنزيمات غالبًا ما تتحلّل في عملية تحويل ضوء الشمس إلى سكريات معقدة، إلا أن الخلايا النباتية تستطيع إما إعادة بنائها أو استبدالها. أدرك يانغ أنّ البكتيريا المعدّلة وراثيًّا يمكن أن تتصرّف بشكل مشابه بعد تزويدها بترسانة من الإنزيمات القوية32، ثم ابتكر طريقة هجينة تفصل الماء بمحفّز غير عضوي لإنتاج الهيدروجين، كما تفعل تقنيات أوراق الشجر الاصطناعية الأخرى، ثم تغذي البكتيريا بالهيدروجين، الذي تجمعه مع ثاني أكسيد الكربون لإنتاج الميثان33.

أخذ نوسيرا بحث يانغ خطوة أخرى إلى الأمام؛ ففي حين أن إعداد يانغ أنتج غاز الميثان فقط، سعى نوسيرا إلى إنتاج مجموعة أكبر بكثير من الوقود السائل بكفاءة أعلى. استخدم جهازه الهجين خلية شمسية كهروضوئية لتشغيل تيار يؤدّي -في وجود محفز غير عضوي- إلى فصل الماء، وبعد ذلك تتمّ تغذية الهيدروجين الناتج، إلى جانب ثاني أكسيد الكربون النقي، للميكروبات التي يمكن أن تنتج أنواعًا مختلفة من الوقود34. كانت الميكروبات رائعة في تحويل ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين إلى أنواع مختلفة من الوقود، لكنّها –مع الأسف- كانت غير متوافقة مع المحفّز غير العضوي الذي أنتج أشكالًا من الأكسجين التفاعلي الذي دمّر الحمض النووي للبكتيريا.

ثم نشر نوسيرا وزملاؤه في عام 2016م ورقة في مجلة Science أعلنوا فيها بانتصار اكتشاف محفّز جديد. هذا المحفّز المكوّن من سبيكة الكوبالت والفوسفور لم يترك البكتيريا سليمة فحسب، بل جُمِّع ذاتيًّا أيضًا خارج المحلول، ما يحاكي محفّزات الشفاء الذاتي الموجودة في الطبيعة.35 وقد تمكّن جهاز نوسيرا مع المحفّز والبكتيريا اللذين يعملان معًا في وئام من تحقيق كفاءة بنسبة 10 بالمئة في تحويل ضوء الشمس إلى وقود كحولي. وأفاد نوسيرا أنّ الميكروبات يجب أن تكون قادرة على إنتاج العديد من الجزيئات الأخرى المحتوية على الكربون لمجموعة من التطبيقات بدءًا من تزويد المركبات بالوقود ووصولًا إلى إنتاج البلاستيك.36 ثم تبع ذلك في عام 2017م، إثبات أنّ نهجًا هجينًا محفزًا مع البكتيريا يمكن أن يثبّت النيتروجين في الغلاف الجوي لإنتاج الأمونيا37. وهذا اكتشاف محيّر؛ لأنّ أكثر من 1 بالمئة من الطاقة العالمية تُستخدم اليوم في إنتاج الأمونيا لتخصيب المحاصيل وإطعام العالم. ويقترح النموذج الأولي لنوسيرا أنّ ضوء الشمس يمكن أن يشغِّل هذه العملية في يوم من الأيام بدلًا من الوقود الأحفوري.

ماحقّقه نوسيرا من إنجاز ينتهك كلا نصفي شعار نيت لويس - "لا حشرات، لا أسلاك"؛ حيث لا يزال العلماء يتساءلون حول ما إذا كانت هذه فكرة جيدة. وفي الواقع أن البكتيريا صعبة للغاية، وحسّاسة للحموضة ودرجة حرارة بيئتها، ولذلك يصعب تصميمها. والأموال الذكية -في الوقت الحالي- تُنفق على الأجهزة التي تسخّر ضوء الشمس لإنتاج الهيدروجين بشكل أسرع من تلك التي تحاول إنتاج وقود معقّد قائم على الكربون. ولكن من خلال الجمع بين المواد الحديثة وسحر

الطبيعة، يستطيع الباحثون تخطي الهيدروجين البسيط في السعي وراء طريق قابل للتطبيق للوصول إلى الإنجاز الأعظم والمطلق: بدائل للوقود الأحفوري نظيفة بنسبة 100٪.

التسخين

على الرغم من الوعود كلّها، فإنّ الوقود الشمسي، الذي ينتج من الهيدروجين أو حتى الوقود السائل المحتوي على الكربون، بعيد كلّ البعد عن الواقع التجاري. لكنّ الطاقة الشمسية المركزة، التي تستخدم ضوء الشمس في توليد الحرارة التي يمكن أن تنتج الكهرباء عند الطلب، موجودة بالفعل على نطاق تجاري، مع إمكانية تخزين طاقة الشمس، وتكميل الإنتاج المتقطع للطاقة الشمسية الكهروضوئية.

تُعدّ فوائد الطاقة الشمسية المركزة أقلّ إثارة من فوائد الوقود الشمسي؛ إذ يمكن تخزين الحرارة المتولدة من الطاقة الشمسية المركزة لبضع ساعات فقط، على عكس التخزين طويل الأجل الذي توفّره أنواع الوقود. وتعيد الطاقة الشمسية المركزة تغذية شبكة الكهرباء مرة أخرى، ما يترك مشكلة تزويد وسائل النقل غير المكهربة والاستخدامات الصناعية بالوقود من دون حل. وعلى المدى القريب، مع ذلك، فإنّ مزيجًا من الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة، مع قدرة الأخيرة للتخزين لحين الحاجة إليها، هو أفضل رهان لتحقيق هدف منتصف القرن المتمثّل في 30 بالمئة من الطاقة الشمسية في مزيج الكهرباء العالمي.

ومع ذلك، باتت آفاق صناعة الطاقة الشمسية المركزة تبدو قاتمة في السنوات الأخيرة مثل الدوّامة الحلقية التي هوت في المصنع المضطرب؛ أي محطة إيفانبا Ivanpah للطاقة الشمسية المركزة في صحراء موهافي بكاليفورنيا. "الحوامة" هو ما يسميه عمال المحطة، وهو أسم يطلق على كلّ طائر سيئ الطالع بما يكفي لأن يحلق في الهواء على بعد 5 أميال مربعة فوق مرايا "حقل التدفّق" التي تركز ضوء الشمس؛38 حيث يقع أكثر من 2000 طائر ضحية لهذا المصير المروع سنويًّا؛ لأنّ النيران تشتعل فيها وتسقط على الأرض.39 وقد حاول مشغلو المحطة بعد تعرّضها لانتقادات بيئية شديدة فعل كلّ شيء لإبعاد الطيور، بدءًا من تهييج الجهاز التنفّسي إلى بثّ الصرخات المسجلة مسبقًا. وعلى الرغم من أنهم حقّقوا نجاحًا محدودًا، فإنّ الطيور لم تكن هي الصداع الأكبر لهم.

يقودنا هذا التميّز إلى الصعوبات التي واجهتها المحطة في زيادة إنتاجها للطاقة المقدّرة؛ فعلى عكس أي مصنع بسيط للخلايا الكهروضوئية الشمسية يتكوّن من ألواح مثبّتة في الأرض، تعتمد محطة إيفانبا على مئات الآلاف من المرايا لتتبع الشمس عبر السماء، وتركيز طاقتها تمامًا على النقطة نفسها فوق برج ضخم يبلغ ارتفاعه قرابة 500 قدم، فتعمل الطاقة على تسخين البخار الذي يمكن بعد ذلك توجيهه عبر الأنابيب لتدوير التوربينات وتوليد الطاقة. وقد حدث خلل بسيط في المحاذاة في عام 2016م عندما استهدفت المرايا نقطة خاطئة على أحد أبراجها الثلاثة، فتسبّب ذلك باشتعال

النيران في البرج، ما أدى إلى ذوبان الأنابيب المعدنية40، فحالت هذه المشكلة الهندسية، بالإضافة إلى أمور أخرى، دون أن يتمكن المصنع من توفير كمّيّة الطاقة التي وعد بها في عقده مع إحدى المرافق في كاليفورنيا. وفي مواجهة نقص في إيرادات عام 2016م، أوشك المصنع على الإغلاق بعد فترة وجيزة من بنائه الباهظ التكلفة، حيث وصلت تكلفة إنشاء المصنع الذي كان مدعومًا إلى حدّ كبير بضمان قرض حكومي أمريكي إلى 2.2 مليار دولار.

أثّرت مشكلات محطة إيفانبا في الصناعة بشكل أوسع؛ فقد نمت صناعة الطاقة الشمسية المركزة بين عامي 2011م و2014م، بمعدّل سريع تجاوز 40 بالمئة سنويًّا41، لكنّ الكثير من هذا النمو عكس اكتمال المشاريع التي تمّ تصوّرها قبل الانهيار في أسعار الطاقة من مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية. فمنذ عام 2014م، تباطأت مشاريع الطاقة الشمسية المركزة الجديدة بشكل ملحوظ؛ لأنّ تكلفة إنشاء محطات الطاقة الشمسية المركزة لم تنخفض بالسرعة نفسها لتكلفة مزارع الطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق. وهذا صحيح على الأقلّ عند قياسه من خلال التكاليف لكلّ كيلو واط/ساعة من الكهرباء، بصرف النظر عن وقت إنتاج تلك الكيلوواط/ساعة. وفي حين أنّ أقلّ تكلفة للكهرباء التي قدّمتها محطة الطاقة الشمسية المركزة في الولايات المتحدة في عام 2016م كانت ما يقرب من 12 سنتًا للكيلوواط/ساعة، فقد وصل أقلّ سعر للكهرباء الصادر من محطة الطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق المرافق أقلّ من 5 سنتات لكلّ كيلوواط/ساعة.42 كافحت الشركات في القطاع للتعامل مع التباطؤ المفاجئ في السوق، وقد أشاد الرئيس باراك أوباما في عام 2016م بشركة أبينجوا Abengoa، وهي شركة إسبانية قامت ببناء مشاريع في ولايتي أريزونا وكاليفورنيا، وبدت الآن تتجه نحو أكبر عملية إفلاس للشركات في التاريخ الإسباني43.

تحسنت نظرة صناعة الطاقة الشمسية المركزة قليلًا منذ ذلك الحين، حيث تمكّنت محطة إيفانبا في عام 2017م، من زيادة إنتاجها من الطاقة إلى المستويات التي وعدت بتقديمها إلى المرفق، وتجنّب الإغلاق44 . ونجت أبينجوا من الإفلاس بصعوبة من خلال صفقة إعادة الهيكلة مع دائنيها،45 وتوقع محلّلو السوق معدّل نمو بطيئًا، ولكنّه ثابت بنسبة 10 بالمئة سنويًّا حتى نهاية العقد46.

إنّ مفتاح تعافي الطاقة الشمسية المركزة والنمو المستقبلي يدور حول القدرة على التخزين؛ إذ يحتوي كلّ مصنع تقريبًا في مرحلة الرسم الهندسي أو قيد الإنشاء في الولايات المتحدة وخارجها على مساحة تخزين مدمجة، وتتزايد كمّيّة التخزين في هذه المصانع. كانت النباتات في الماضي تستطيع تخزين ما لا يزيد على ست ساعات من الطاقة على شكل حرارة، حتى تتمكّن من الاستمرار في التوليد بعد غروب الشمس. لكنّ محطة كريسنت ديونز Crescent Dunes التي افتُتحت في أواخر عام 2015م في ولاية نيفادا، يمكنها تخزين ما يصل إلى عشر ساعات من الطاقة، وتشغيلها طوال الليل لتصل طاقتها 110 ميغاوات.47 وكانت الشركة نفسها تخطط لافتتاح محطة هجينة للطاقة الشمسية في تشيلي في عام 2019م؛ لتوليد الطاقة الكهروضوئية نهارًا مع

تخزين الحرارة من الطاقة الشمسية المركزة في أربع عشرة ساعة من التخزين الحراري لدفع إنتاج الكهرباء ليلًا.

التخزين مهم جدًا لأنه ما يميز الطاقة الشمسية المركزة عن الكهروضوئية؛ فحتى لو كانت الطاقة الكهروضوئية أرخص لكلّ كيلوواط/ساعة، فإنّ الطاقة الشمسية المركزة تصبح تنافسية عند الأخذ في الحسبان قيمة "القابلية للانتشار"، أو القدرة على إنتاج الطاقة عند الطلب. وسيكون هذا مهمًّا أكثر فأكثر مع زيادة انتشار الطاقة الكهروضوئية على شبكات الطاقة؛ حيث تتوقّع إحدى الدراسات أنّه في ولاية كاليفورنيا، بمجرد أن تمثّل طاقة الرياح والطاقة الشمسية ثلث إنتاج الكهرباء على الأقلّ، فإنّ قيمة كيلوواط/ساعة من محطة الطاقة الشمسية المركزة مع ست ساعات من التخزين الحراري، يمكن أن تكون أكثر من ضعف تلك الناتجة من المحطة الكهروضوئية.

تُعدّ الطاقة الشمسية المركزة من حيث القيمة أفضل؛ لأنّها مع ميزة التخزين يمكن أن تتجنّب انكماش القيمة، في حين أنّ المحطات الكهروضوئية مضطرة إلى إنتاج الطاقة عندما لا تكون الشبكة في أمسّ الحاجة إليها، بينما يمكن لمحطات الطاقة الشمسية المركزة تخزين الطاقة الإضافية وتفريغها عندما يكون الطلب أكبر، والحصول على أموال مقابل الزيادة بدلًا من إهدارها. تقدّم أسواق الطاقة اليوم في الولايات المتحدة وأماكن أخرى بعض التعويض عن قابلية الانتشار، ولكن أقلّ من قيمتها الحقيقية للشبكة. ومع ذلك، ومع تصاعد الضغط على الشبكة من تغلغل الكهروضوئية، ستواجه الهيئات التنظيمية والمرافق في المستقبل ضغوطًا متزايدة لتحفيز الموارد القابلة للتوزيع، مثل الطاقة الشمسية المركزة، لتشغيلها. ومن المرجح مع مرور الوقت أن تهب على الطاقة الشمسية المركزة رياح اقتصادية مواتية وذلك لقدراتها التخزينية.وتتوقّع إحدى الدراسات أنّه على الرغم من أنّ الطاقة الكهروضوئية سوف تتقدّم في الإنتشار، فإنّ الطاقة الشمسية المركزة سوف تلحق في النهاية مع تزايد الحاجة إلى التخزين؛ ويمكن أن توفر الطاقة الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة معًا غالبية الطاقة في العالم بحلول نهاية القرن48.

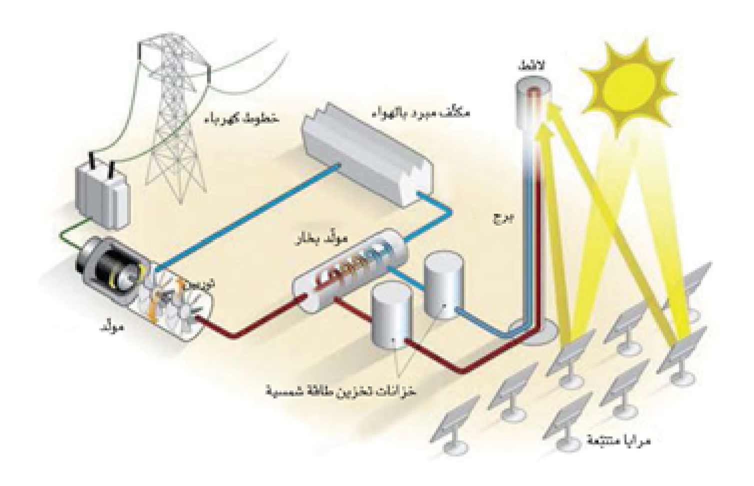
ومع ذلك، لا تزال أنظمة الطاقة الشمسية المركزة ذات التخزين الحراري بحاجة إلى أن تكون أرخص وأكثر كفاءة قبل أن تنطلق التقنية بشكل عملي. وسيتطلب ذلك، كما تكون قد خمّنت، ابتكارًا تقنيًّا. وهناك موضوع واحد متّسق يمر عبر مختلف مجالات البحث والتطوير الجارية حاليًّا لتحسين تقنية الطاقة الشمسية المركزة: رفع درجة الحرارة؛ فإذا شُغّلت محطة الطاقة الشمسية المركزة المستقبلية في درجات حرارة أعلى بكثير من أنظمة اليوم، فيمكنها تخزين المزيد من الطاقة، وإنتاج المزيد منها بتكلفة أقلّ. لكن تسخين الحرارة سيتطلب حلّ بعض التحدّيات التقنية الشائكة.

تعمل الطاقة الشمسية المركزة بشكل أساسي من خلال تركيز طاقة الشمس لتسخين سائل ناقل للحرارة، والذي يمكن أن يرتفع في درجة الحرارة، ويسهل نقله عبر الأنابيب، ويمكنه تحويل حرارته إلى عمل ميكانيكي لتدوير التوربين (أو نقل حرارته إلى سائل آخر، يسمّى "سائل التشغيل

أو التحويل working fluid"، الذي يمكنه القيام بالعمل الميكانيكي). افترض أن البخار هو سائل نقل الحرارة في محطة الطاقة الشمسية المركزة. على الرغم من إمكانية استخدام العديد من السوائل الأخرى، مثل الزيت الاصطناعي والأملاح المنصهرة أيضًا. تتمثّل الخطوة الأولى في دورة محطة الطاقة الشمسية المركزة هذه في تركيز أشعّة الشمس على تبخير الماء المضغوط لإنتاج بخار عالي الضغط. ثم يُنقل البخار إلى التوربين، حيث يتمدّد ويبرد، وبذلك ينقل طاقته لتدوير التوربين، الذي بدوره يولد الكهرباء. وبعد ذلك يُبرَّد البخار منخفض الضغط بحيث يتكثف مرة أخرى إلى الماء السائل، ويمكن أن يبدأ الدورة من جديد.

تُعدّ درجات الحرارة المرتفعة مهمّة جدًّا جزئيًّا؛ لأنّ كفاءة مولد الكهرباء تعتمد على اختلاف درجة الحرارة بين المراحل الساخنة والباردة لمائع التحويل. إن من شأن تسخين البخار إلى درجة حرارة أعلى قبل وصوله إلى التوربين، وكذلك تبريده أكثر بعد تمدّده، أن يزيد من كفاءة تحويل الطاقة الحرارية إلى كهرباء. وتتيح درجات الحرارة المرتفعة أيضًا تخزينًا أفضل للطاقة، إذ يمكن تخزين سائل نقل الحرارة في خزان لاستخدامه لاحقًا أو يمكنه نقل طاقته إلى مادة تخزين حراري أخرى. وتجعل درجات الحرارة المرتفعة عملية تخزين الطاقة وإطلاقها أكثر كفاءة، وتطيل المدّة التي يمكن خلالها استخدام الحرارة لتوليد الطاقة، ومن الممكن أن تقلل هاتان الميزتان معًا من تكلفة توليد الطاقة وتخزينها من الطاقة الشمسية المركزة.

تعلّمنا الكتب المدرسية تقليديًا أنّ أربعة تكوينات مختلفة يمكن أن تسمح لمصنع الطاقة الشمسية المركزة بحصاد ضوء الشمس، لكنّ تكوينًا واحدًا فقط يمكنه تحقيق درجات حرارة عالية وتخزين الطاقة. وعليه، من المحتمل أن يكون له مستقبل، إذ يستخدم التصميمان؛ تصميم القطع المكافئ ومجمّعات فرينل Fresnel الخطية، مرايا لتركيز ضوء الشمس على أنبوب طويل، وهو ترتيب يحدّ بوجه عام من درجات الحرارة إلى أقلّ من 400 درجة مئوية. أما المحرّك الثالث، وهو محرّك أطباق ستيرلنغ Stirling Dish Engine، فيمكن أن يصل إلى درجة حرارة عالية تصل إلى 800 درجة مئوية، غير أنّه يفتقر إلى المقياس لتمكين التخزين، ما يحدّ من مستقبله التجاري.إذن ليس من المستغرب أن تُحدَّد مشروعات الطاقة الشمسية المركزة الجديدة بشكل متزايد لاستخدام تكوين "برج الطاقة power tower "، الذي تعمل به محطة إيفانبا. ويمكن من خلال ترتيب مجال كامل من المرايا المتتبعة، أو "الهليوستات heliostats"، لعكس وتركيز أشعّة الشمس على نقطة واحدة في أعلى البرج، أن تحقّق الطاقة الشمسية المركزة نظريًّا درجات حرارة عالية جدًّا (الشكل 7.3)، فضلًا عن أنّ لديها المقياس لتمكين تخزين الطاقة الحرارية بتكلفة فعّالة49.



الشكل (7.3): كيف يعمل برج الطاقة الشمسية المركزة. يوضّح هذا التخطيط كيف تقوم مصفوفة من المرايا الشمسية المتتبعة بتركيز ضوء الشمس على جهاز استقبال في أعلى برج، ما ينقل طاقة الشمس إلى سائل نقل الحرارة. يمكن تخزين السائل الساخن لاستخدامه لاحقًا (أو يمكن نقل حرارته إلى وسط تخزين طاقة آخر). لتوليد الكهرباء، تُستخدم الحرارة المخزنة لتسخين البخار الذي يدير بعد ذلك توربينًا بخاريًّا لإنتاج الكهرباء. ويمكن بعد ذلك زيادة جهده بوساطة محوّل، بحيث يمكن نقل الطاقة لمسافات طويلة. في التصميمات المستقبلية، يمكن أن يحلّ ثاني أكسيد الكربون الحرج محلّ البخار بوصفه سائل التحويل الذي يحرّك التوربين؛ من أجل تمكين درجة حرارة تشغيل أعلى وكفاءة أكبر في توليد الكهرباء.

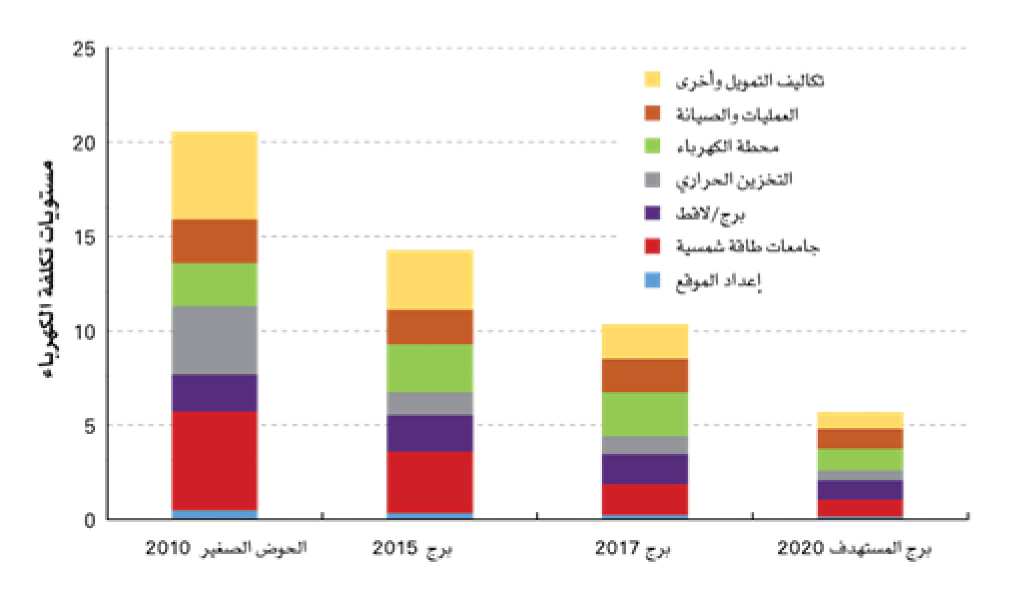
المصدر: برنامج صن شوت Sunshot Program التابع لوزارة الطاقة الأمريكية.

لكن الواقع لا يزال بعيدًا عن بالنظرية؛ فأبراج الطاقة الحالية محدودة بدرجات حرارة أقلّ من 600 درجة مئوية. وللوصول إلى درجات حرارة أعلى مما هو ممكن مع الماء، تستخدم العديد من هذه النباتات الأملاح المنصهرة بوصفها سائلًا لنقل الحرارة. ولسوء الطالع، فإنّ الأملاح المنصهرة الأكثر استخدامًا، التي تسمّى "النترات"، تتحلّل بالقرب من 600 درجة مئوية، ما يمنعها من الوصول إلى درجة حرارة أعلى. ونتيجة لذلك، عندما تنقل الأملاح المنصهرة طاقتها إلى بخار، يكون هذا البخار أكثر برودة مما سيكون عليه في محطة طاقة تعمل بالغاز الطبيعي أو أنواع الوقود الأحفوري الأخرى. إنّ التشغيل في درجات حرارة منخفضة يجعل مولّد الطاقة الشمسية المركزة أقلّ كفاءة من محطة توليد الغاز الطبيعي؛ حيث يُحوَّل 40 بالمئة فقط من الحرارة الملتقطة من ضوء الشمس إلى كهرباء، في حين يمكن أن تصل إلى 60 بالمئة من الكفاءة في تحويل الحرارة من احتراق الغاز إلى كهرباء. وعندما يؤخذ في الحسبان أيضًا الطاقة المفقودة من تحويل ضوء الشمس إلى حرارة باستخدام مرايا مركزة، يمكن لأبراج الطاقة الحالية تحويل ما بين 20 بالمئة و24 بالمئة من الطاقة الشمسية الواردة إلى كهرباء.

يتابع الباحثون خيارات عدّة لرفع هذا الرقم، وتتمثّل الخطوة الأولى في اختراق حاجز درجة الحرارة للأملاح المنصهرة الحالية؛ حيث يمكن للصيغ التي تسمّى "الكلوريدات" التغلب على حاجز

600 درجة مئوية لتصل إلى 700 درجة مئوية أو أعلى.[50] بدلًا من ذلك، ابتكر باحثون في مختبر ساندِيا الوطني Sandia National Laboratory في نيو مكسيكو "مستقبل الجسيمات الساقطة" الأنيق، الذي يرشّ تيارًا من الجسيمات الصلبة الشبيهة بالرمال من أعلى البرج عبر النقطة المحورية للأشعّة الشمسية المركزة لتسخينها. وتمكن باحثو المركز من تسخين هذه الجسيمات إلى 700 درجة مئوية، ليكسروا حاجز الملح المصهور التقليدي، ويتوقعون أنه يمكنهم الوصول إلى 1200 درجة مئوية. وسيتعيّن عليهم للوصول إلى هناك، تصميم حاوية لتلك الجسيمات التي يمكنها تحمّل الحرارة الشديدة. المفهوم أنيق لأنّ التيار المتساقط للجسيمات الساخنة متعدّد الاستخدامات: يمكن تحويله لنقل الحرارة إما إلى سائل التحويل في التوربين (لتوليد الكهرباء) أو إلى صهريج تخزين، حيث يمكن أن تبقى الجسيمات في درجة حرارة عالية، من أجل الاستخدام ليلًا. يتوّج هذا التصميم بمصعد دلو يُعيد تدوير الرمال الباردة إلى أعلى البرج لإعادة التسخين[51].

ستفتح درجات الحرارة المرتفعة هذه طرقًا فعّالة جديدة لتشغيل المولد. على سبيل المثال، عند درجات حرارة أعلى من 700 درجة مئوية، يكون بالإمكان استبدال البخار بثاني أكسيد الكربون "فوق الحرج" (عند درجة حرارة عالية وضغط مرتفع) كسائل تحويل لتشغيل التوربين؛ فثاني أكسيد الكربون فوق الحرج يكون دائمًا غازًا حتى مع ارتفاع درجة حرارته أو تبريده. لذلك، فهو يتجنّب فقْد الطاقة الباهظ الذي ينطوي عليه الاضطرار إلى تبخير الماء السائل لتكوين البخار. يتوقع الباحثون أنّ هذه الإستراتيجية يمكن أن تزيد من كفاءة تحويل الطاقة الحرارية إلى 55 بالمئة، وهي نسبة مقاربة جدًّا لمصنع الغاز الطبيعي. وستُترجم هذه الكفاءة المتزايدة لتوليد الطاقة إلى انخفاض في التكلفة، ربما بنسبة 40 بالمئة، ما يجعل الطاقة الشمسية المركزة مع التخزين المدمج في حدود 6 سنتات لكلّ كيلوواط/ساعة (الشكل 7.4)[52].



الشكل (7.4): التكاليف التاريخية والمستهدفة للطاقة الشمسية المركزة. يوضّح الشريط الأول التكاليف المختلفة التي تتكوّن من التكلفة الإجمالية لكلّ كيلوواط/ساعة من الكهرباء لمحطة الطاقة الشمسية المركزة في الولايات

المتحدة في عام 2010م. ويعرض العمودان الثاني والثالث تكاليف محطات الطاقة الشمسية المركزة في برج الطاقة في عامي 2015م و2017م. أخيرًا، يعرض الشريط الرابع التكلفة المستهدفة من وزارة الطاقة لمحطة الطاقة الشمسية المركزة لبرج الطاقة التي تعمل عند درجة حرارة أعلى، وتستخدم ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج بوصفه سائلًا تحويليًا.

المصدر: برنامج صن شوت Sunshot Program التابع لوزارة الطاقة الأمريكية.

ركّزت في هذا الفصل على الحلول الهجينة لتوليد الوقود من أشعّة الشمس؛ حيث يمكن للتقنية الهجينة أيضًا أن تعزّز الطاقة الشمسية المركزة، وسوف أناقش نهجين مختلطين لتحسين كفاءة الطاقة الشمسية المركزة؛ أحدهما للمدى القريب والآخر للمستقبل.

تتمثّل إحدى الطرق الممكنة للوصول إلى درجات حرارة عالية على المدى القريب في الجمع بين الطاقة الشمسية المركزة والغاز الطبيعي؛ إذ تستطيع المرايا تكثيف طاقة الشمس وتركيزها على الهواء المضغوط، وتسخينه حتى 800 درجة مئوية. ويمكن بعد ذلك تسخين هذا الهواء إلى 1200 درجة مئوية عن طريق حرق الغاز الطبيعي. سيكون الهواء المضغوط الشديد الحرارة قادرًا على تشغيل توربين واحد لتوليد الكهرباء، ومن ثم يمكن استعادة حرارة العادم عند قرابة 650 درجة مئوية لتشغيل التوربين الثاني وتوليد المزيد من الطاقة. تشبه هذه الطريقة عالية الكفاءة المعروفة باسم "الدورة المركبة"، الطريقة التي تولد بها محطات توليد الطاقة بالغاز الطبيعي الحديثة الكهرباء، ولذلك قد يكون من الممكن إعادة توظيف الكثير من معدات مصنع الغاز لتوفير التكاليف53.

قد يحقّق النهج الهجين الذي يجمع بين الطاقة الشمسية المركزة والطاقة الكهروضوئية على المدى الطويل كفاءات قياسية دون مساوئ انبعاثات الكربون الناتجة من حرق الغاز الطبيعي؛ حيث سيسعى هذا النهج لوضع كلّ جزء من طيف الشمس في الاستخدام الأكثر كفاءة. وعليه، يمكن تحويل جزء الأشعّة تحت الحمراء، الذي ينقل الحرارة، إلى كهرباء بوساطة نظام الطاقة الشمسية المركزة، ويمكن امتصاص فوتونات الطاقة الأعلى بوساطة الألواح الكهروضوئية وتحويلها إلى كهرباء أيضًا، ما ينتج عنه كفاءة إجمالية عالية للمحطة الهجينة.

إن أكبر عائق أمام مثل هذا النظام الهجين هو عدم التوافق في درجات الحرارة المثلى؛ ففي حين أنّ الطاقة الشمسية المركزة تعمل بشكل أفضل في درجات الحرارة المرتفعة، فإنّ الكهروضوئية هي الأنسب للدرجات المنخفضة. ولذلك قد تُطلب أفكار أكثر جذرية، بما في ذلك اختراع حديث في جامعة ستانفورد لجهاز تتعاون فيه الفوتونات الشمسية والحرارة الشديدة على هزّ الإلكترونات الخالية من أشباه الموصلات، ما ينتج منه تيار كهربائي54.

الموضوع المشترك الذي يوحّد هذه الاتجاهات البحثية المثيرة هو الحاجة إلى الوصول إلى درجات حرارة أعلى؛ فإذا تمكّن الجيل الثاني من محطات الطاقة الشمسية المركزة من اختراق حواجز

درجة الحرارة الحالية، فيمكن للسوق أن تتعافى، وتبدأ في النمو بسرعة جنبًا إلى جنب مع التوسّع السريع لسوق الكهروضوئية. وبسبب التخزين المدمج في الطاقة الشمسية المركزة، يمكن أن يكون توسّع الطاقة الشمسية المركزة أمرًا حاسمًا لتمكين اختراق عالٍ للطاقة الشمسية في شبكة الطاقة؛ بعبارة أكثر بساطة، إذا ارتفعت حرارة سوق الطاقة الشمسية المركزة، فقد لا تضطر الأرض إلى ذلك.

التخطيط للمستقبل

قدّم هذا الفصل والفصل السابق مجموعة من التقنيات التي تشترك في خاصّية واحدة مهمّة: وهي أنّ حاجة العالم ستزداد إليها مع مرور الوقت. ففي حين أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون هي في الوقت الحالي العمود الفقري لصناعة الطاقة الشمسية المتنامية في عالم تولد فيه الطاقة الشمسية 2 بالمئة فقط من الكهرباء العالمية، فإنّ الألواح الكهروضوئية الحالية قد لا تكون كافية في عالم يتّسم بدرجة أعلى من انتشار الطاقة الشمسية.وسيكون على الطاقة الشمسية الكهروضوئية لتجاوز انكماش القيمة، أن تكون أرخص بكثير بشكل أسرع، وتتطلب تقنيات جديدة، مثل البيروفسكايت التي لا تقل تكلفة صنعها عن طباعة الصحف. ولتسهيل إنتاج الكهرباء الكهروضوئية المتقطع، يجب أن تنمو الطاقة الشمسية المركزة بسرعة لتوفير طريقة بديلة لتسخير ضوء الشمس، وتخزين الطاقة الملتقطة.

أخيرًا، لتمكين الطاقة الشمسية من توفير ليس فقط الكهرباء لشبكة الطاقة، ولكن أيضًا الوقود للتطبيقات الأخرى التي تقاوم الكهرباء، مثل تشغيل السيارات والشاحنات والسفن والطائرات والمنشآت الصناعية، فسيحتاج العالم إلى مولّدات ضخمة تعمل بالوقود الشمسي وتكون قادرة على إنتاج كمّيات كبيرة من الهيدروجين أو حتى الوقود السائل القائم على الكربون. وسيكون من الجيد امتلاك هذه التقنيات الآن، لكنها ستكون ضرورية في العقود القادمة إذا أراد العالم تجنّب آثار تغيّر المناخ الكارثي، والانتقال بعيدًا عن الوقود الأحفوري في قطاعات الاقتصاد جميعها.

من المؤسف أن العلماء لا يستطيعون أن يقرعوا أصابعهم بمجرد ظهور حاجة ماسة للتقنية، ويبتدعوا ابتكارات جديدة. وبدلًا من ذلك، يمكن أن تمتدّ عملية تحويل التقدّم البحثي الصغير إلى مشاريع تجارية واسعة النطاق لعقود، وهذا الجدول الزمني يقاوم الضغط. على سبيل المثال، خلصت إحدى الدراسات حول مشاريع الطاقة الشمسية المركزة في جميع أنحاء العالم إلى أنّ عملية توسيع نطاق التقنية من العروض التجريبية الأولى استغرقت أكثر من عقدين، على الرغم من حدوث الكثير من التقدم في العقد الأخير55. وقد يفترض المرء أنّ الفارق الزمني بين أول مصنع تجريبي من نوعه وقدرة الصناعة على نشر المشاريع الكبيرة بشكل متكرّر هو عقد من الزمان.

ماذا سيحدث في هذه الحالة إذا استطاعت البلدان والشركات الخاصّة بالكاد تمويل تطوير تقنية الطاقة الشمسية المركزة على مدى السنوات العشر القادمة، بينما يبدو الأمر كما لو أنّ الطاقة الكهروضوئية ستظلّ أكثر تنافسية من الناحية الاقتصادية؟ عندما يبدأ عام 2030م، وتُحقّق الطاقة الشمسية الكهروضوئية تغلغلًا كبيرًا في العديد من الأسواق حول العالم، ما يؤدّي إلى نسف اقتصادياتها، قد تدرك البلدان بشكل متأخر أنّ الطاقة الشمسية المركزة مع التخزين المدمج يمكن أن تخفّف الضغط على شبكات الكهرباء الخاصّة بها. ولكنّ الأمر قد يستغرق في هذه المرحلة حتى عام 2040م أو ما بعده؛ لدفع مشروعات الطاقة الشمسية المركزة عالية الحرارة والفعّالة من حيث التكلفة إلى نطاق تجاري. وقد تندم البلدان على العقد الضائع من الاستثمار في الابتكار الذي كان من الممكن أن يوفّر خيارًا قابلًا للتطبيق للتخفيف من تقطّع الطاقة الشمسية بمجرد أن يبدأ في التسبّب في مشكلات خطيرة.

يُعدّ الوضع أكثر خطورة بالنسبة إلى التقنيات الأخرى التي نوقشت في هذا الفصل؛ لأن تطبيقاتها التجارية تتطلب توسيع نطاق الابتكارات على المستوى النانوي حتى مقياس متطلبات الطاقة الهائلة للبشرية. سوف يستغرق الأمر سنوات عدّة على الأقلّ لبناء أول عرض توضيحي في العالم الحقيقي لملعب كرة قدم من الغطاء المطلي بالبيروفسكايت للخلايا الكهروضوئية لتوليد الكهرباء، أو تكوينه على شكل خلية كهروكيميائية ضوئية لإنتاج الهيدروجين. وقد تمكّن العلماء بصعوبة حتى الآن من صنع أجهزة بحجم أظافر الأصابع تُظهر متانة لا يعتمد عليها. ومن هناك سيستغرق الأمر عقدًا آخر للانتقال من مرفق تجريبي إلى إنتاجه ونشره على نطاق تجاري، وسيؤدّي الفشل في الاستثمار في إعداد هذه التقنيات اليوم إلى تكاليف باهظة عندما تكون هناك حاجة لهذه التقنيات في المستقبل.

لذلك، فإن الابتكار التقني هو أولوية يتمّ تكبد تكاليفها مقدّمًا وتُجنى ثمارها بعد سنوات أو عقود في المستقبل، ولن تُلبّى هذه الأولوية من خلال الاستجابة للحاجات في الوقت الفعلي، وسوف تستغرق بدلًا من ذلك تخطيطًا طويل الأجل. سيضع الفصل العاشر الذي يقدّم توصيات إلى صانعي السياسة في الولايات المتحدة، مخططًا تفصيليًّا لكيفية دعم الحكومة الفيدرالية الأمريكية للابتكار، وقيادة دفعة عالمية للبحث والتطوير وعرض التقنيات الجديدة. لكنّ الفرضية الشاملة بسيطة- وقد سمّتها تويوتا بكلمة واحدة؛ إنها ميراي -أو "المستقبل"- وهي ما يحتاج العالم بشكل عاجل للاستعداد له.

الجزء الرابع جمع كلّ شيء معًا

المحاور الرئيسة

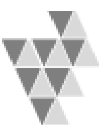
• النوع الأخير من الابتكار الذي تحتاجه الطاقة الشمسية من أجل تحقيق إمكاناتها هو الابتكار المنهجي الذي يتضمّن إعادة تشكيل أنظمة الطاقة بأكملها، بما في ذلك البنية التحتية المادية والأسواق الاقتصادية والسياسات العامة؛ من أجل تمكين انتشار عالٍ للطاقة الشمسية.

• من المرجّح أن تظلّ الألواح الكهروضوئية الشمسية التي تنتج الكهرباء عندما تشرق الشمس فقط الوسيلة المهيمنة لتسخير ضوء الشمس. ومع ارتفاع حصّة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في إمدادات الكهرباء، ستحتاج شبكة الكهرباء إلى تحمّل كمّيّات هائلة من الطاقة المتقطعة. الفصل الثامن، "هل الأكبر أفضل؟" يفكر فيما إذا كان من المنطقي توسيع الشبكة لتسخير ضوء الشمس أينما كانت الشمس مشرقة أو لجعل الشبكة أصغر نسبيًّا، من خلال تحقيق اللامركزية في توليد الطاقة واستهلاكها عن طريق استخدام تقنية الشبكة الذكية. وقد يكون الحلّ الأفضل في النهاية مزيجًا من كلا النهجين لجعل الشبكة أكبر وأصغر وأكثر ذكاءً في آنٍ معًا.

الحلّ الأكثر بدهيّة لمشكلة التقطّع هو جمع الطاقة الشمسية الكهروضوئية داخل مخازن للطاقة. الفصل 9، "لا توجد عصًا سحرية"، يجادل، مع ذلك، أنّ الاعتماد على البطاريات فقط، وهي تقنية التخزين الأكثر شيوعًا، سيكون باهظ التكلفة. ومن حسن الطالع، توجد العديد من الطرق لإعادة إنشاء المزايا نفسها لتخزين البطارية؛ إذ يمكن لمزيج متنوّع من محطات الطاقة تحويل إنتاجها بمرونة لتعويض الطاقة الشمسية المتغيّرة. ويمكن أن يوفّر ربط نظام الكهرباء بقطاعات أخرى، مثل النقل والتدفئة وإنتاج المياه العذبة أو الزراعة، مصادر مرنة للطلب لامتصاص فائض الطاقة الشمسية.

• تؤثر الولايات المتحدة بصورة حاسمة في دفع الابتكار الذي تحتاجه الطاقة الشمسية. يحذر الفصل العاشر، "مدينة شمسية على تلة"، من أثر سياسات إدارة ترامب بتقليل المثال الساطع الذي حدّدته الولايات المتحدة تاريخيًّا بوصفها المموّل الأول في العالم لابتكار الطاقة. ولاغتنام الفرصة الاقتصادية المتزايدة التي تقدّمها الطاقة الشمسية والتنافس مع الشركة القائدة الحالية للسوق ا (الصين)، يتعيّن على صانعي السياسة في الولايات المتحدة زيادة التمويل للبحث والتطوير، وإظهار تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة، فضلًا عن تقنيات الطاقة الأخرى التي تحتاجها الطاقة الشمسية من أجل الازدهار. وبالإضافة إلى دعم الابتكار التقني، يتعيّن على صانعي السياسة في الولايات المتحدة

أن يكونوا قدوة لبقية العالم؛ من خلال تشجيع الابتكارات المالية والمنهجية لتمهيد الطريق لاستمرار نهوض الطاقة الشمسية.



الفصل الثامن هل الأكبر أفضل؟

إن الشيء الوحيد الأكثر إثارة للدهشة من الشراكة بين رجل أعمال ياباني وتكنوقراط صيني هو الاقتراح الذي توحّدا على تقديمه. سيكلف "الربط العالمي للطاقة Global Energy Interconnection " -كما أطلقا عليه- 50 تريليون دولار، ويربط كلّ قارة بخطوط النقل تحت سطح البحر، لتزويد العالم بالطاقة النظيفة. ستُصدِّر طواحين الهواء في القطب الشمالي والألواح الشمسية في الصحراء الكبرى الطاقةَ لتشغيل المدن الكبرى في العالم. وبالمناسبة ستؤمّن هذه الشبكة الفائقة أيضًا السلام والوئام في العالم.

اعتاد أحد هذين الشريكين الغريبين على الأقل اقتراح أهداف جريئة. يُعدّ ماسايوشي سون Masayoshi Son ثاني أغنى رجل في اليابان، وهو يُعرف بالمقطع الأول من اسمه "ماسا"، أما شبكة الكهرباء العملاقة فهي أحدث أسماء التفضيل لديه. وضع نصب عينيه أيضًا تحويل سوفتبانك Softbank (المجموعة التي يقودها) إلى إمبراطورية أعمال ستستمر 300 عام، وأطلق صندوقًا ضخمًا في عام 2017م بقيمة 100 مليار دولار للاستثمار في قطاع التقنية. لقد تنبّأ أنّ أجهزة الحاسوب ستتجاوز الذكاء البشري بحلول منتصف القرن، محقّقة معدّل ذكاء يبلغ 110,000. ورهانه على شبكة الكهرباء العملاقة يتناسب تمامًا مع "أفكاره المجنونة" الأخرى كما يصف نفسه2.

شرع ماسا بعد كارثة محطة فوكوشيما النووية عام 2011م في تسخير الطاقة المتجدّدة بوصفها بديلًا للطاقة النووية وتزويد اليابان بالطاقة. ويعترف بذلك قائلًا: "كنت شخصًا عاديًّا تمامًا في مجال الطاقة المتجدّدة وقت وقوع الزلزال". ربما تفسّر قلّة الخبرة اقتراحًا يرفضه معظم الخبراء تمامًا، لكنّ رؤية ماسا الأولية لاستيراد اليابان للطاقة الشمسية وطاقة الرياح من صحراء جوبي، كان لها صدىً لدى المديرين التنفيذيين للمرافق في روسيا وكوريا الجنوبية والصين. وقد وقّعت المرافق الثلاثة وسوفتبانك في عام 2016م مذكرة تفاهم للتعاون في شبكة عملاقة لعموم آسيا3.

كان شريك ماسا الصيني ليو زينيا Liu Zhenya؛ رئيس مجلس إدارة شركة شبكة الكهرباء الوطنية، ثاني أكبر شركة في العالم. ويُعدّ ليو العقل المدبّر لخطة التحوّل إلى العالمية في نهاية المطاف بمجرد أن يُحقِّق هدف إنشاء شبكة آسيوية عملاقة. وعلى عكس ماسا، لم يكن ليو معروفًا بصياغة رؤىً جريئة، بل إنه، في الواقع، لم يكن معروفًا بقوله الكثير من أيّ شيء على الإطلاق. كان ليو مهندسًا من حيث التخصّص، وقد عمل في إدارة سلطة الدولة طوال حياته المهنية، وصعد بهدوء إلى أعلى مراتب شركة شبكة الكهرباء الوطنية.

لكنّ عمله تحدّث عن نفسه؛ فقد أنشأت الصين في عهده شبكة خطوط نقل التيّار المستمرّ فائق الجهد (UHVDC-current-direct-voltage-high-ultra)، وهي تقنية تراجعت مؤخّرًا من حيث التكلفة، ويمكنها نقل الطاقة لمسافات طويلة من دون خسائر فادحة. وتمتلك الصين حاليًّا سبعة من هذه المشاريع العملاقة التي تشحن الطاقة المتجدّدة من المناطق الغربية النائية من البلاد إلى المدن الكبرى في الساحل الشرقي، فضلًا عن أنّ لديها ضعف عدد المشاريع تحت الدراسة الهندسية. ولا تزال الولايات المتحدة -على النقيض من ذلك- تحاول بناء أول خط لنقل الجهد العالي والتيار المباشر، وهو مشروع بقيمة 2.5 مليار دولار، لإرسال طاقة الرياح من ولاية أوكلاهوما إلى ولاية تينيسي4.

تقدّم شركة شبكة الكهرباء الوطنية الصينية الآن خبرتها إلى الخارج مستفيدة من نجاحها في الداخل، وقد استعانت البرازيل بها لبناء أطول خط نقل في العالم، يبلغ طوله أكثر من 1500 ميل، لتوصيل الطاقة الكهرومائية من الأمازون إلى ريو دي جانيرو؛5 حيث تمثّل هذه الجهود المرحلة الأولى من ثلاث مراحل يتصوّرها ليو لتحقيق شبكة عالمية فائقة؛ هي: أولًا، ستبني البلدان شبكات النقل الخاصّة بها، حيث تخطط الصين لإنهاء هذه المرحلة بحلول عام 2025م. وسترتبط الدول بعد ذلك على المستوى الإقليمي، بما يتماشى مع رؤية ماسا المبكرة لشبكة عملاقة آسيوية وغيرها من المقترحات الطموحة، مثل شبكة لربط شمال إفريقيا المشمسة بأوروبا العاصفة. ثم ستجمع المرحلة الثالثة الكبرى بعد ذلك بين الشبكات الكبرى الإقليمية لتشكيل شبكة عملاقة عالمية واحدة، مرتبطة بكابلات عابرة للمحيطات ومحطات كهربائية كبيرة حيث تتلاقى الخطوط (الشكل 8.1).



الشكل (8.1): شبكة عملاقة عالمية. تجمع هذه الخريطة بين العديد من الشبكات الإقليمية الكبرى المقترحة (على سبيل المثال، في منطقة آسيا والمحيط الهادئ وأوروبا والشرق الأوسط/شمال إفريقيا وأمريكا الشمالية). تمثّل الخطوط السوداء خطوط نقل الجهد العالي والتيار المستمر طويلة المدى.

مصدر: أعيد طبعه بإذن من Gellings (2015).

يدعم ليو الآن رؤيته بشكل عملي؛ فعندما بلغ سن التقاعد الإلزامي في الصين في عام 2016م، واستقال من منصبه بوصفه رئيسًا لشركة شبكة الكهرباء الوطنية، تولى على الفور رئاسة منظمة مكرّسة لتحقيق حلمه في مجال ربط الطاقة العالمية (ماسا هو نائب الرئيس). وقد ألّف أيضًا كتابًا دراسيًّا مكثّفًا حول الترابط العالمي للطاقة، الذي يوفّر خريطة طريق تقنية خطوة بخطوة، بما في ذلك التقنيات المحدّدة التي تتطلب المزيد من الاستثمار في البحث والتطوير لتصبح قابلة للتطبيق تجاريًّا. وبما أنّ الشبكة العالمية الفائقة يمكن أن "تؤمن إمدادات طاقة آمنة ونظيفة وفعّالة ومستدامة، مع وجود شبكات الجهد العالي [UHV] بوصفها عمودها الفقري، فإنّ مثل هذا الترابط العالمي للطاقة ينقل الطاقة النظيفة بشكل أساسي ".

وبالنظر إلى براعة الصين في بناء بنية تحتية ضخمة، من القطارات السريعة إلى تخطيط المدن، فإن مفهوم الشبكة الفائقة جاذب ومنطقي بشكل مفهوم من منظور ليو. وفي الحقيقة أن الشبكة الفائقة تُعدُّ إحدى الطرق لحلّ المشكلة الخطيرة لتقطع الطاقة المتجدّدة التي لم تُجهّز الشبكات المجزّأة حول العالم للتعامل معها بشكل جيد. وعلى الرغم من أنّ الشمس لن تشرق دائمًا في مكان معين، فإنّها ستكون دائمًا في مكان ما في العالم، ويمكن لشبكة كبيرة أن تربط الموارد المتجدّدة البعيدة بالمراكز الحضرية التي تتطلّب الطاقة. وبوجه عام كلما كبرت الشبكة، كان من الأسهل مطابقة العرض والطلب.

لكن الشبكة العملاقة ستخلق، مع ذلك، مجموعة من التحدّيات الخاصّة بها، التي لم يعالجها ملف ليو بشكل كافٍ على الرغم من تخصيص أكثر من 300 صفحة للتفاصيل الهندسية. ويبدو أن ليو وجد ملهمته الإبداعية في الفصل الأخير، بعنوان "ربط الطاقة العالمية يغيّر العالم"، حيث يتحول الكتاب عن مساره الرصين إلى أقسام فرعية يغلب على عناوينها طابع التمني بشكل متزايد؛ مثل "إنشاء سيناريو جديد للطاقة"، "غرس قوّة جديدة في النمو الاقتصادي "، و" إنشاء حياة اجتماعية جديدة رائعة "، و" الانتقال لفصل جديد من الحضارة ".

ألقى ليو خطابًا أمام الأمم المتحدة على المنوال نفسه؛ وتوقّع فيه أن "يتحوّل العالم إلى قرية عالمية مسالمة ومتناغمة مع طاقة كافية، وأراضٍ خضراء، وسماء زرقاء."7 لكنّ تنبؤاته حول العلاقات الدولية تتعارض مع الكيفية التي يعمل بها العالم في الواقع. أولًا، سيكون حمل الدول على دفع مبالغ مالية تصل إلى 50 تريليون دولار، كما تتطلب الخطة، أمرًا صعبًا ("مستحيل سياسيًّا" كما حذره مستشارو ماسا). يضاف إلى ذلك أيضًاأن العديد من الدول قد تقلق بشأن استيراد الطاقة من الخارج. ويشكّك البريطاني بيتر ليتلوود Peter Littlewood، أستاذ الفيزياء في جامعة شيكاغو، في رؤية ليو العظيمة، مستحضرًا تجربة أوروبا المضطربة في اعتمادها على الغاز الطبيعي الروسي؛ فقد قال في إحدى تصريحاته المميزة: "إحساسي هو أنّ الدول ستكون قلقة بشأن الاعتماد على شركاء قد لا يكونون أصدقاء معهم دائمًا."8

على الرغم من التحدّيات السياسية، فإنّ الجوانب العملية لبناء شبكة عملاقة جديرة بأن تؤخذ في الحسبان، كما هي الحال مع الأفكار الأخرى الجاهزة لاستيعاب كمّيّات متزايدة من المصادر النظيفة ولكن المتقطعة في أنظمة الطاقة. وعلى أيّ حال يؤكّد مفهوم الشبكة العملاقة الحجم الهائل الذي قد يكون ضروريًّا لتمكين نظام الكهرباء العالمي للاعتماد بشكل كبير على مصادر الطاقة المتقلبة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وحتى لو كان الابتكار التقني تقديم لقّات لا حصر لها من الطلاءات الكهروضوئية فائقة الكفاءة والرخيصة نسبيًّا، فإنّ شبكات الطاقة الحالية ستظلّ تكافح من أجل دمج الكتل الناتجة من الكهرباء غير الموثوقة. إن تمكين التوسع المستمر في الطاقة الشمسية الكهروضوئية سيتطلب أيضًا وقف انكماش القيمة؛ لذا فإنّ قيمة الكهرباء فيها أكبر من تكاليف توليدها. وسيتعيّن على الدول لتلبية هذه المطالب إعادة التفكير في البنية التحتية الكاملة لشبكات الكهرباء الخاصّة بها، والقيام بذلك في الوقت المناسب، حتى يصل العالم إلى هدف توليد ثلث طاقته الكهربائية من الطاقة الشمسية بحلول منتصف القرن (بوجه عام، معظم حاجات الكهرباء من مصادر خالية من الكربون).

يعتقد كثيرون أنّ مفتاح استيعاب ارتفاع الطاقة الشمسية ومعالجة التقطّع هو تخزين الطاقة الزائدة في البطاريات؛ لكنّ البطاريات تظلّ باهظة الثمن، على الأقل في الوقت الحالي. قد يكون توسيع الشبكة بديلًا مناسبًا، إلا أنه سيظل للبطاريات مكان، لكنّها لن تكون الحلّ الوحيد، أو حتى الأساسي، (انظر الفصل 9 لمزيد من التفاصيل). فإذا قمت ببناء شبكة كبيرة بما يكفي، فإن الحاجة إلى جمع كمّيّات هائلة من البطاريات باهظة الثمن ستنخفض لأن تقلّبات الطقس وعدم ثبات الطلب ستتوزع على مساحات كبيرة. وإدراكًا للإيجابيات التي توفّرها هذه الميزة، تكتسب المقترحات الخاصّة بالشبكات الإقليمية العملاقة زخمًا في جميع أنحاء العالم، ولا سيّما في آسيا وأوروبا وأمريكا الشمالية.

ومع ذلك، فإن مساعي بناء شبكات أكبر ليس المحاولة الوحيدة الجارية لتحويل قطاع الطاقة؛ ففي الواقع جذبت فكرة مناقضة تمامًا الانتباه، وخاصّة في نيويورك وكاليفورنيا وبعض الولايات الأمريكية الأخرى؛ فالشبكات العملاقة المترابطة معرضة للفشل ذريع، كما ذكّر بذلك إعصار ساندي الأشخاص الذين يعيشون في نيويورك ونيوجيرسي في عام 2012م. ولكن الشبكات اللامركزية التي تعتمد بشكل أكبر على موارد الطاقة المحلية، مثل خلايا الوقود والبطاريات للألواح الشمسية على الأسطح، يمكن أن يكون أكثر مرونة في مواجهة الكوارث الطبيعية أو غير ذلك.

زد على ذلك، يمكن أن تكون الشبكة اللامركزية أرخص من الشبكة المركزية، من الناحية النظرية. وقد يؤدّي تقليص الاستثمارات في البنية التحتية المترامية الأطراف للشبكة التقليدية، من خطوط الكهرباء إلى المحطات الفرعية، إلى خفض فواتير العملاء. وقد لا تختفي هذه المدّخرات إذا استمرت الفجوة في التقارب فيما يتعلق بالتكلفة بين الطاقة الرخيصة من المحطات الكبيرة والطاقة باهظة الثمن تقليديًّا من الموارد الصغيرة. وأخيرًا، إذا انطلقت الأسواق الاقتصادية اللامركزية،

حيث يستطيع العملاء تبادل خدمات الطاقة مع جيرانهم، فإنّ الشبكة اللامركزية يمكن أن تعمل اليوم بكفاءة أكبر بكثير من نظام الطاقة المركزي المفرط، وغير الملائم والمركزي.

توجد أسباب للاعتقاد بأنّ الشبكات اللامركزية ستواجه صعوبة أكبر في دمج الطاقة الشمسية مقارنة بالشبكات الأكبر. ومع ذلك يمكن أيضًا تقديم الحجج المضادة؛ حيث إنّ الشبكة اللامركزية ستعتمد بشكل أكبر على مصادر الطاقة المحلية، مثل الطاقة الشمسية على الأسطح، وهي أغلى من الطاقة الشمسية على نطاق المرافق. وستتعرض الشبكة اللامركزية لضغوط شديدة لتحقيق التوازن بين العرض والطلب على الطاقة على نطاق المجتمعات الفردية، في حين أنّ الشبكة المركزية يمكن أن تتخطى تقلب العرض والطلب في مناطق واسعة بسهولة. ومن ناحية أخرى، قد تزيد الأسواق الاقتصادية اللامركزية من قيمة الطاقة الشمسية الصغيرة من خلال تعويض مالكي الطاقة الشمسية وذلك للمساهمة في استقرار الشبكة. هذه الجاذبية المتزايدة يمكن أن تسرّع من نشر منشآت الطاقة الشمسية الموزّعة، خاصة ذات الحجم المتوسط لبضعة ميغاوات التي تُعدّ فعّالة من حيث التكلفة وذات قيمة للشبكة إذا كانت الشبكة اللامركزية أيضًا "ذكية". أي إذا كانت الشبكة والمعدات التي تعمل بها يمكن أن تتحدّث بعضها مع بعض، فتستطيع الشبكة أن تتكيّف مع طلب العملاء بسرعة كبيرة. ويمكن عندها أن تتطابق بين الطلب والعرض المتقلب من الطاقة الشمسية المتقطعة، سواء من محطات الطاقة الشمسية على نطاق المرافق أم المنشآت الموزّعة.

قد تقع الشبكات الفائقة والشبكات اللامركزية على طرفي نقيض من طيف الحجم، لكنّ كليهما يتطلّب ابتكارًا منهجيًّا، أو أساليب جديدة لتركيب جميع قطع الألغاز في نظام الطاقة معًا. ويمكن أن يشمل الابتكار المنهجي استخدام تقنيات جديدة؛ بل إن كلا النموذجين الجديدين للشبكة سيتطلبان تقنيات محسّنة للتقدّم، لكنّ الابتكار المنهجي يختلف عن الابتكار التقني؛ لأنه يشمل أيضًا الحصول على أدوات جديدة رائعة للعمل معًا بسلاسة. مثلًا، ستتطلّب الشبكات العملاقة شبكة طبولوجية جديدة؛ أي تصميمات لتخطيط خطوط طاقة جديدة وربطها بالشبكات الموجودة، وستضيف الشبكة الذكية اللامركزية اتصالًا ثنائي الاتجاه بين المرافق والعملاء، واستخدام خوارزميات البرامج لتشغيل الشبكة بشكل أكثر ذكاءً من اليوم.

إلى أي طريق يتّجه العالم؟ وهل الأكبر هو الأفضل دائمًا؟ لا توجد إجابات واضحة حتى الآن. ربما تكون الطريقة الواعدة للمضي قدمًا هي اتباع إستراتيجية هجينة لتوسيع الشبكة وتوطينها في الوقت نفسه، مع جعلها أكثر ذكاءً مما هي عليه اليوم. وقد تعتمد مثل هذه الشبكة الهجينة على العمود الفقري لخطوط النقل لمسافات طويلة لربط المناطق البعيدة، وتوفير الطاقة المتجدّدة من أكثر المناطق التي لديها وفرة من أشعّة الشمس والرياح. إنّ استكمال هذه الطرق السريعة للطاقة النظيفة سيكون شبكات صغيرة لامركزية تخدم- على سبيل المثال- الأحياء أو القواعد العسكرية أو المدارس، وكلّها متصلة بعضها ببعض في شبكة ذكية. وقد يؤدّي تقاعد الكثير من البنية التحتية باهظة الثمن والضخمة الموجودة في تركيبة شبكة اليوم إلى دفع تكاليف كلّ من الشبكات العملاقة

والشبكات الصغيرة ذات الأصول الخفيفة. ويستطيع نموذج الشبكة الهجينة هذا أن يتغلب على تقلبات الطاقة المتجدّدة من خلال النطاق الواسع للعمود الفقري للإرسال إلى مسافات طويلة، والاستجابة الدقيقة للشبكة الذكية اللامركزية.

وعلى الرغم من أنّ نماذج الشبكة العملاقة والشبكة اللامركزية تمثّل انحرافات جذرية في اتجاهين متعاكسين عن نظام الطاقة الحالي، إلا أنها قد تتعايش في الواقع في شبكة هجينة متقدّمة حقًّا. وربما لا يكون مثل هذا المستقبل بعيد الاحتمال أكثر من الشراكة بين ماسا وليو، وهما رجلان لا يوجد بينهما سوى القليل من القواسم المشتركة باستثناء أحلام مستقبل مدعوم بالطاقة النظيفة.

لنتّحد معًا

أعلن عنوان في صحيفة الغارديان البريطانية في عام 2015م أن "طاقة الرياح تولد 140 بالمئة من الطلب على الكهرباء في الدنمارك"،9 وقد كان هذا صحيحًا من الناحية الفنية ـ لقد كانت الرياح شديدة في أحد أيام الصيف، فولّدت مزارع الرياح في كلّ مكان في الدنمارك طاقة كافية لتلبية طلب الدولة بأكملها، مع فائض للبيع لجيرانها. أما فيما يتعلق بإرسال الفائض للجيران، فبدت وكأنها فكرة أتت متأخرة، ولكنّ هؤلاء الجيران يشكلون أهمّية بالغة بالنسبة إلى قدرة الدنمارك على توفير أكثر من ثلث الكهرباء السنوية من طاقة الرياح المتقلبة بشكل كبير.

تُعدّ شبكة الدنمارك جزءًا من الشبكة المتزامنة Nordic Synchronized Area الأكبر في شمال أوروبا، وهي شبكة تشمل أيضًا النرويج والسويد وألمانيا، وتوفّر ما يقرب من ثلاثين ضعف الطاقة التي تستخدمها الدنمارك وحدها. أما بالنسبة إلى الشبكة الأكبر، فإنّ طاقة الرياح الدنماركية تُعدّ قطرة في دلو، والدلو هي في الواقع استعارة مناسبة؛ لأنّ الشبكة الاسكندنافية تتميّز بخزانات مائية ضخمة في السويد والنرويج، وهي بارعة في تخزين الطاقة المتجدّدة غير المستقرة عن طريق ضخّ المياه أعلى التلال، واستعادتها عند الطلب عن طريق السماح للمياه بالتدفّق مرة أخرى إلى المنحدرات لتشغيل التوربينات الكهرومائية. وعلى الرغم من العنوان الدرامي لصحيفة الجارديان، فقد شكّلت الرياح أقلّ من 15 بالمئة من الكهرباء المنتجة في عام 2015م عبر الشبكة الاسكندنافية بأكملها10.

يُعدّ وضع الدنمارك حجة لتصميم شبكات كبيرة عابرة للحدود، ويمكن أن تكون هذه الشبكات أكثر كفاءة من الشبكات المعزولة؛ لأنّها يمكن أن تستمدّ الطاقة من أيّ مصادر أرخص وأكثر توافرًا في وقت ما، بصرف النظر عما إذا كانت تلك المصادر قريبة. وتستطيع الشبكات الأكبر أيضًا الاستفادة بشكل أكبر من المصادر النظيفة ولكن المتقطعة، ما يقلّل من النفايات، ويزيد من الحوافز لتوسيع تغلغل الطاقة المتجدّدة في قطاع الكهرباء. والسؤال المطروح على مخططي مثل هذه الشبكات يدور حول أفضل طريقة لربط الأجزاء المتباعدة من الشبكات.

في حالة الشبكة الاسكندنافية، مكّن وجودها من نشر المزيد من طاقة الرياح أكثر مما كان ممكنًا لو انفصلت البلدان المكوّنة بعضها عن بعض. وفي الواقع فإنّ أحد الأسباب الرئيسة التي تجعل ألمانيا (التي وفّرت ثلث قوتها في عام 2016م) رائدة عالميًّا في مصادر الطاقة المتجدّدة هو قدرتها على تصدير الطاقة الفائضة إلى جيرانها، حيث إنّها تبني خطوط نقل جديدة إلى السويد والنرويج للوصول إلى مرافق تخزين الطاقة الكهرومائية الواسعة، واستخدام المزيد من الطاقة المتجدّدة.

إنّ ربط الشبكات بعضها ببعض يسهل على الدول زيادة حصّتها من الطاقة المتجدّدة المتقلبة مع الاستمرار في مواءمة العرض والطلب على الطاقة؛ فعلى جانب العرض، يمكن أن يكون في المنطقة التي تغطيها شبكة أكبر أنماط مناخية أكثر تنوّعًا من أيّ دولة بمفردها؛ حيث تتيح الشبكة المشتركة إمكانية استغلال هذه الأنماط للحفاظ على ثبات مصدر الطاقة للعملاء. مثلًا، نادرًا ما تواجه شبكة كبيرة بما يكفي سماءً ملبّدة بالغيوم على امتدادها الجغرافي بالكامل؛ ولذلك ستستمر بعض الألواح الشمسية على الأقلّ في إنتاج الطاقة مع انخفاض الإنتاج من الأخرى. وبالمثل فإن توربينات الرياح المتنوّعة جغرافيًّا ستنتج طاقة أقلّ تطايرًا مما لو كانت مركزة على المستوى الإقليمي. كما أن الرياح والشمس مترابطتان أيضًا في العديد من المناطق. أي عندما تغرب الشمس ليلًا، تهبّ الرياح بقوّة أكبر، ولذلك تستطيع شبكة كبيرة تمتدّ عبر المناطق العاصفة والمشمسة تحقيق مستويات متّسقة نسبيًّا من الإنتاج المتجدّد. صحيح أنّ هناك حدودًا لما يمكن أن يحقّقه توسع الشبكة، فنظرًا إلى أنّ الشمس تتحرّك من الشرق إلى الغرب، فإنّ توسّع الشبكة من الشمال إلى الجنوب لا يخفّف من تقلبات الطاقة في الدورة الشمسية اليومية. ومع ذلك، تستطيع خطوط النقل لمسافات طويلة بين الشرق والغرب المساعدة في هذا التقلب اليومي، ولن يساعد توسّع الشبكة أيضًا عند حدوث كسوف للشمس - من حسن الطالع، فإنّ تلك الأحداث المؤثّرة على نطاق واسع نادرة، ويمكن التنبؤ بها[11].

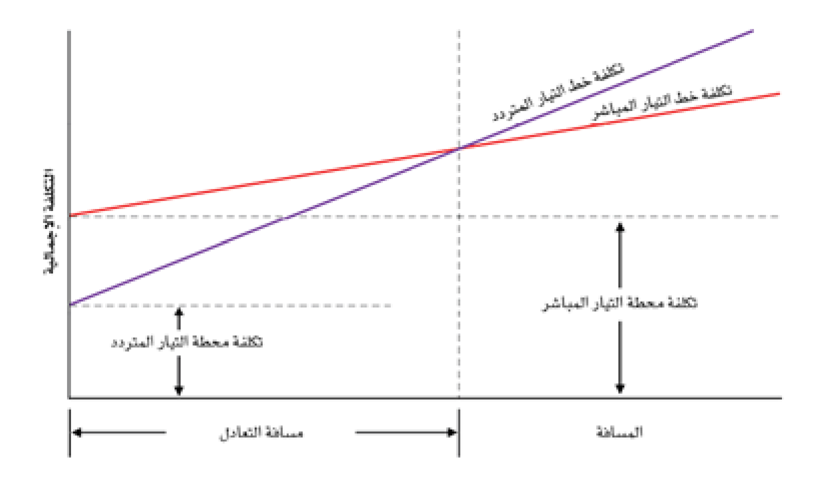
أما من ناحية الطلب، فكلّما كانت الشبكة أكبر، كان من الأسهل مطابقة العرض المتجدّد مع مراكز الطلب. وغالبًا ما تكون أفضل موارد الطاقة المتجدّدة بعيدة عن المناطق الحضرية الرئيسة. فكّر في الصحراء المشمسة أو السهول العظيمة التي تجتاحها الرياح، والتي يمكن لشبكة كبيرة ربطها. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّ ربط مراكز الطلب المختلفة له تأثير ملطف مماثل في الطلب الكلي؛ مثل ربط المصادر المتنوّعة جغرافيًّا لأنواع مختلفة من إمدادات الطاقة المتجدّدة؛ فعندما تحتاج منطقة ما إلى كثير من الطاقة، فيمكنها الحصول عليها من الأماكن التي تتطلّب طاقة أقلّ في الوقت نفسه[12].

كانت تقنية ربط المناطق البعيدة بخطوط النقل موجودة بالفعل منذ النصف الأول من القرن العشرين، وقد أدرك مهندسو أنظمة الطاقة في وقت مبكر من عشرينيات القرن الماضي أنّ خطوط طاقة التيار المستمر عالي الجهد (HVDC) كانت ملائمة للنقل لمسافات طويلة أكثر من نظائر التيار المتردّد عالي الجهد (HVAC). وهذا غير منطقي بالنظر إلى أن الفصل الخامس أوضح أن التيار المتردّد صار في أوائل القرن العشرين المعيار العالمي المفضّل لشبكات الطاقة؛ لأنه كان من

السهل تحويل جهد طاقة التيار المتردّد (ويكاد يكون من المستحيل القيام بذلك بالنسبة إلى طاقة التيار المستمر)؛ حيث يُفقَد قدر أقلّ من الكهرباء عند الفولتية العالية في أثناء النقل. نشأت شبكات طاقة التيار المتردّد لخدمة الطلب المتزايد على الكهرباء؛ لأنه من المنطقي وضع محطات الطاقة بعيدًا نسبيًّا عن مكان استهلاك الطاقة، بدلًا من الاعتماد على نظام التيار المستمر، الأمر الذي يتطلب توليدًا واستهلاكًا مشتركًا. كان توماس إديسون الذي فضّل استخدام التيار المستمر، في الجانب الخاسر من هذه الحجة، على الرغم من أنه صعق حيوانات المزرعة بالكهرباء علنًا في محاولة لتحويل الرأي العام ضد نظام التيار المتردد، بينما حقّق نيكولا تيسلا فوز التيار المتردّد بتزويد مدينة نيويورك بخط نقل تيار متردّد من شلالات نياجارا.

أما بالنسبة إلى الإرسال إلى مسافات طويلة فعلًا (أي مئات الأميال أو أكثر)، فحتى طاقة التيار المتردّد عالي الجهد لا ترقى إلى مستوى المهمّة؛ فعند الفولتية العالية المطلوبة لتلك المسافات (عدة مئات من الآلاف إلى أكثر من مليون فولت)، تكون خطوط التيار المستمر عالي الجهد أرخص بكثير، وتفقد طاقة أقلّ من نظيراتها. وفي الواقع إنّ نقل الطاقة بالتيار المستمر يكون دائمًا أكثر كفاءة (أي يفقد طاقة أقلّ) من نقل طاقة التيار المتردّد، فضلًا عن أنّ الموادّ التي يتطلّبها أقل من موادّ خطوط طاقة التيار المتردّد، ما يجعلها أرخص. لكنّ التكلفة الباهظة لمحوّلات زيادة جهد كهرباء التيار المستمر وتقليله في بداية خط النقل ونهايته قد استبعدت تقليديًّا التيار المستمر لمعظم استخدامات الشبكة، بينما محوّلات جهد التيار المتردّد غير مكلفة نسبيًّا.

ومع ذلك، فعند الفولتية الأعلى والمسافة الأطول، فإن التوفير من خطوط طاقة التيار المستمر عالي الجهد الأكثر كفاءة والأرخص تكلفة يكفي للتعويض عن محوّلات التيار المستمر باهظة الثمن (الشكل 8.2). يُضاف إلى ذلك أنّ خطوط التيار المستمر عالي الجهد تتطلب مساحة أقلّ عند بنائها فوق الأرض، ويمكن حتى وضعها تحت الأرض، في حين لا يمكن وضع خطوط التيار المتردّد لمسافات طويلة تحت الأرض بسبب فقد الطاقة المرتفع للغاية.



الشكل (8.2): مقارنة التكلفة التخطيطية لخطوط طاقة التيار المتردّد مقابل التيار المستمر. يبيّن هذا الرسم البياني التخطيطي التكلفة الإجمالية لخطوط طاقة التيار المتردّد والتيار المستمر كدالة لطولها، حيث تكون خطوط التيار المتردّد أرخص على مسافات أقصر؛ لأنّ محطات التيار المتردّد التي تحوّل الجهد إلى مستويات أعلى أو أقلّ، أرخص من محطات التيار المستمر، التي تحوّل الجهد إلى مستويات أعلى أو أقلّ. ولكن على مسافات أطول، سرعان ما تصبح خطوط التيار المتردّد أكثر تكلفة؛ لأن تكلفة خطوط الكهرباء تفوق تكلفة المحطة؛ وذلك لأنّ خطوط التيار المتردّد لمسافات طويلة لها خسائر عالية، وتتطلب مواد أكثر بكثير من خطوط التيار المستمر ذات الجهد المكافئ. ولذلك، وبعيدًا عن مسافة التعادل، التي عادة ما تكون عدّة مئات من الأميال، فإن خطوط التيار المستمر ذات الجهد العالي هي الخيار الأرخص، حتى مع مراعاة المحطات باهظة الثمن.

اعترافًا بأنّ محوّلات الجهد كانت عنق الزجاجة الباهظة الذي يرفع تكلفة تقنية التيار المستمر عالي الجهد الأرخص والأكثر تفوّقًا، حيث عمل المهندسون في أوروبا والولايات المتحدة طوال القرن العشرين لتطوير محوّلات أقلّ تكلفة. لقد ربط أول مشروع تجاري للتيار المستمر عالي الجهد جزيرة قبالة السويد مع البر الرئيسي في عام 1954م. وأطلقت تقنية محوّل للطاقة متقدّم في السبعينيات موجة من الخطوط الجديدة في أوروبا وآسيا وأمريكا الشمالية13؛ (أحدها وصلة تيار الباسيفيك المستمر Pacific DC، وهو خط التيار المستمر عالي الجهد بطول 1000 ميل تقريبًا تم بناؤه في عام 1970م؛ لربط شمال غرب المحيط الهادئ بلوس أنجلوس.وقد أوصيت في عام 2013، عندما كنت مستشارًا لعمدة لوس أنجلوس أنطونيو فيلارايجوسا، بأن تستثمر المرافق البلدية أكثر من 100 مليون دولار لتحديث محطة تحويل سيلمار التي تخدم لوس أنجلوس. هذه التحسينات جارية الآن)14.

كانت خطوط التيار المستمر عالي الجهد التي بنيت في القرن العشرين مقتصرة على ربط نقطتين بعيدتين فقط، ومع ذلك فإن تقنية المحوّل الجديدة المعروفة باسم "محوّل مصدر الجهد voltage source converter" جعلت من الممكن في الآونة الأخيرة الاستفادة من خط التيار المستمر عالي الجهد في العديد من النقاط على طول رحلته. وتثير هذه القدرة احتمالية وجود شبكة مترابطة ومتداخلة من خطوط التيار المستمر عالي الجهد بدلًا من المشاريع الفردية لمرة واحدة، ويمكن أن تسمح هذه الشبكة بتوصيل العديد من مصادر العرض والطلب مع تقليل خسائر النقل على مسافات طويلة. علاوة على ذلك، ستمكّن محوّلات مصدر الجهد شبكة التيار المستمر عالي الجهد هذه من الارتباط بشبكات التيار المتردّد الحالية، مع وضع الطبقة الأولى فوق الأخيرة.

ولكي تكون شبكات التيار المستمر عالي الجهد ميسورة التكلفة وفعّالة على نطاق واسع، فإنها بحاجة إلى مزيد من التقنيات. ويتضمّن ذلك قواطع دوائر التيار المستمر التي يمكنها إيقاف التدفقات الحالية الهائلة في غضون أجزاء من الثانية لضمان موثوقية الشبكة. وقد تتيح التطوّرات الحديثة في المواد المعروفة باسم "أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق العريضة bandgap-wide semiconductors " قواطع دوائر منخفضة التكلفة وعالية الأداء ومحوّلات الجهد وإلكترونيات الطاقة الأخرى لشبكات التيار المستمر عالي الجهد.15 ويمكن مستقبلًا أن يعزّز استبدال خطوط

الطاقة النحاسية أو الألومنيوم الحالية بكابلات فائقة التوصيل الطاقة التي يمكن أن يحملها خط التيار المستمر عالي الجهد مع خفض فقد الطاقة إلى الصفر تقريبًا. ومع أنّ هذه الخطوط فائقة التوصيل ستحتاج إلى التبريد إلى ما يقرب من -200 درجة مئوية، لكنّ مكاسب الكفاءة يمكن أن تفوق تكاليف التبريد16.

وعلى الرغم من أنّ تقنيات التيار المستمر عالي الجهد لا تزال قيد التطوير، إلا أن الصين تمضي قدمًا في هذا المجال، وتخطط في غضون ذلك لتطوير كلّ ما تحتاجه؛ فبعد أن شيّدت بالفعل أكبر شبكة تيار مستمر عالي الجهد في العالم، فقد تنفق 4 تريليونات دولار حتى عام 2040م؛ لتقليل الانبعاثات من قطاع الطاقة الخاص بها، وإنشاء شبكة أكبر من التيار المستمر فائق الجهد UHVDC (وهي مجرد HVDC عند الفولتية العالية - قرابة 1 مليون فولت أو أعلى).17 قد يكون بعض هذا البناء الطموح مفرطًا، لكن الصين اشتهرت في الواقع ببناء مشاريع بنية تحتية مكلفة وغير مجدية، مثل الطرق والسكك الحديدية إلى المناطق ذات الكثافة السكانية المنخفضة.18 وتشير إحدى الدراسات إلى أنّ تعزيز شبكة التيار المتردّد القديمة الجيدة يمكن أن تستغل الطاقة المتجدّدة الفائضة بشكل أفضل من بناء خطوط التيار المستمر فائق الجهد جديدة وطويلة، التي قد تأتي بنتائج عكسية من خلال توفير أسواق بعيدة لمحطات الفحم الداخلية غير الفعّالة.19 وعلى أي حال، يتفق معظم الخبراءعلى أن توسّع الصين في خطوط الكهرباء سيساعد في تقليل حجم الطاقة المتجدّدة التي يتم التخلص منها بسبب توليدها في مناطق نائية معزولة عن مراكز الطلب.

وبناءً على التقدّم الذي أحرزته الصين، يتصوّر ليو وماسا ربط الصين بالدول الآسيوية الأخرى لإنشاء شبكة إقليمية عملاقة. وعلى الرغم من أنّ الفوائد المتوقّعة باهظة الثمن، مثل القدرة على نقل طاقة متجدّدة بعيدة ورخيصة إلى مدن بعيدة، إلا أنها قد تفوق التكاليف. والميزة الأخرى لربط الشبكات عبر الحدود الوطنية هي أن كلّ دولة لن تضطر إلى الحفاظ على قدرة توليد احتياطيةبشكل مستقل لضمان موثوقية الطاقة. وبدلًا من ذلك تستطيع البلدان تجميع احتياطياتها، وإزالة التكرارات، وتقليل السعة الإجمالية المطلوبة. وفي هذا السياق، وجدت دراسات تحاكي النماذج المختلفة أنّ شبكة عملاقة في شمال شرق آسيا تربط الصين واليابان وكوريا الجنوبية ومنغوليا وشرق روسيا يمكن أن تكون مجدية اقتصاديًا، على الرغم من التكلفة العالية لبناء خطوط نقل جديدة،20 لكنّ ربط أستراليا، عبر أسلاك تحت الماء وخطوط برية عبر جنوب شرق آسيا، قد يكون مغامرة ومهمة صعبة في الوقت الحالي21.

وقد طرح اقتراح آخر لشبكة عملاقة إقليمية واعدة من شأنها أن تربط أوروبا بشمال إفريقيا، لكن هذه الفكرة توقفت بعدما واجهت عقبات عملية. في عام 2009م أسّس إئتلافًا تجاريًا-كونسورتيوم- من المستثمرين الأوروبيين تحت اسم DESERTEC، وهو مشروع لتزويد أوروبا بالطاقة الشمسية من الصحاري المشمسة في شمال إفريقيا. لكنّ المستثمرين تراجعوا بحلول عام 2013م، وانهار البرنامج. ومع ذلك، بدأ مشروع الطاقة الشمسية المركزة بالعمل في منطقة ورزازات

بالمغرب في عام 2016م). كان الهدف من المشروع في الأصل هو تصدير الطاقة إلى أوروبا، وقد يساعد على إنعاش فكرة الشبكة العملاقة22.

(نصيحة سياحية: تقع هذه المحطة على بعد أقلّ من ساعة سفر بالسيارة من قرية آيت بن حدو السياحية الشهيرة. الموقع يستحقّ الزيارة لمشاهدة المرايا المكافئة الممتدة على مد البصر.

أكدت دراسة حديثة جدوى ربط شبكة التيار المتردّد الأوروبية بشمال إفريقيا عبر خطوط التيار المستمر عالي الجهد؛ للحدّ بشكل كبير من انبعاثات الكربون للشبكة العملاقة المدمجة، لكن السعر يتجاوز 200 مليار دولار.23 لذلك، فإنّ مقترحات زيادة ربط شبكة أوروبا، وهي الأكبر في العالم من حيث قدرة التوليد المتصلة، لديها الفرصة الأكثر واقعية للإنجاز على المدى القريب. ويتضمن ذلك ربط شبكة الشمال مع روسيا، وتوصيل طاقة الرياح البحرية في بحر الشمال إلى بلدان مختلفة، وتحقيق خطة عمرها ستين عامًا لربط آيسلندا ببقية أوروبا عبر اسكتلندا.

تعدّ أمريكا الشمالية مرشّحًا ممتازًا لمزيد من الترابط عبر المحيط الأطلسي بناءً على شبكة الولايات المتحدة وكندا المتكاملة جيدًا؛ فقد وجدت إحدى الدراسات التي ركزت على الولايات المتحدة فرصًا لأكثر من 20000 ميل من خطوط نقل التيار المستمر عالي الجهد الجديدة لربط البلد بأكمله داخليًا لتمكين زيادة في الطاقة المتجدّدة.24 وهناك المزيد من الفرص لتكامل الشبكة القارية، حيث يمكن أن تزيد صادرات الطاقة الكهرومائية الكندية إلى الولايات المتحدة بمقدار عشرة أضعاف إذا طوّرت كندا بالكامل مواردها من الطاقة الكهرومائية، وأنشأ البلدان موصلات جديدة للتيار المستمر عالي الجهد.25 ومع ذلك، فإنّ أكبر المكافآت تكمن في الجنوب؛ حيث كانت تجارة الكهرباء عبر الحدود بين الولايات المتحدة والمكسيك محدودة تاريخيًّا. وبعد أن أصلحت المكسيك أسواق الطاقة لديها الآن، ناقش البلدان تكامل شبكتيهما مع إضافة قدرة نقل جديدة؛26 وسيتيح هذا التكامل للولايات المتحدة الوصول إلى موارد الطاقة الشمسية الهائلة في المكسيك في المناطق المشمسة، مثل باجا كاليفورنيا. وقد اتفق رؤساء دول أمريكا الشمالية الثلاث في عام 2016م على هدف قاري للوصول إلى 50٪ من الكهرباء الخالية من الكربون بحلول عام 2025م27.

وعندما يتعلق الأمر بصياغة تفاصيل ربط الشبكة عبر الحدود، توجد فرص للتعاون (بما يتفق مع توقعات ليو للانسجام العالمي)، ولكن توجد أيضًا فرص للخلاف، فلدى الدول المختلفة قوانين ولوائح مختلفة تحكم أسواق الطاقة، وقد يكون تنسيقها عبر الحدود أمرًا صعبًا، بالإضافة إلى أنّ الدول عرضة للجدال حول كيفية تخصيص تكاليف مشاريع النقل المشتركة.

ويمكن لمجموعة كاملة من الخلافات الدولية أن تغيّر رغبة الدول في اتخاذ زمام المبادرة بشكل مشترك وربط أنظمة الطاقة، فعلى الرغم من الصداقة الحميمة بين ماسا وليو، فإنّ اليابان والصين مختلفتان بسبب التوترات السياسية والعسكرية الخطيرة، بما في ذلك النزاعات البحرية في بحر

الصين الشرقي. وقد تكون مثل هذه التوترات أكبر عقبة أمام الدول التي يثق بعضها ببعض بما يكفي لزيادة اعتمادها على الطاقة المتداولة عن طيب خاطر.

لذلك، فإن هدف ليو النهائي المتمثل في تجاوز الشبكات الإقليمية العملاقة لتحقيق شبكة عالمية هو أمر غير معقول إلى حد كبير، ويتطلب المزيد من الثقة الدولية، والمزيد من الأموال، والمزيد من التقدم في تقنيات معينة مثل الكابلات البحرية. ومع ذلك، قد تعمل هذه الرؤية النهائية كهدف مُلهم، وإن كان من المستحيل تحقيقه، فحتى التقدم الجزئي، مثل إنشاء شبكات عملاقة إقليمية، من شأنه أن يشكل خطوة كبيرة إلى الأمام بالنسبة للعالم. وفي الواقع، ستكون الشبكات الأكبر ضرورية للاستفادة من أفضل موارد الطاقة الشمسية وغيرها من الموارد المتجدّدة في العالم.

ومع ذلك، فإن الدفع نحو إنشاء شبكات أكبر من أيّ وقت مضى له منتقدوه، الذين يؤكّدون بدلًا من ذلك أن الشبكات اللامركزية الأصغر تقدّم عددًا لا يحصى من الفوائد مقارنة بالنموذج المركزي، ويمكن أن تكون المرونة الفائقة في مواجهة الكوارث الطبيعية أو الكوارث من صنع الإنسان من أكثر هذه الفوائد إلحاحًا.

الاستعداد للعاصفة المدمرة الآتية

من ناحية الأرصاد الجوية، كان إعصار ساندي في عام 2012م عاصفة متوسطة، وهي عاصفة من الفئة 2 مقارنة بالوحوش من الفئة 5 التي يطلقها المحيط الأطلسي بصورة متكررة كلّ بضع سنوات. ولكن بهدف دقيق وتوقيت متقن، اقتحم الإعصار ساندي مدينة نيويورك عند ارتفاع المد، وصار عاصفة عظيمة، سببت أضرارًا بعشرات المليارات من الدولارات، وهو ثاني أعلى إجمالي خسائر في تاريخ الولايات المتحدة. كانت الخسائر على شبكة الكهرباء شديدة، وقد واجه أكثر من مليوني ساكن في مدينة نيويورك انقطاعات عن العمل؛ فقد أغلق الإعصار ثلث المولدات التي تخدم المدينة، وأغرق خمس محطات نقل تيار كهربائي فرعية كبيرة، ودمّر أعمدة الكهرباء والمعدات في شبكة التوزيع28.

سوف يشهد المستقبل نسبة أكبر من العواصف العاتية بسبب تغيّر المناخ،، ويمكن أن يتكرر فيضان القرن الذي ضرب بعض المناطق الأمريكية في عام 1997 قريبًا في هذا العقد29، وفي الوقت نفسه الذي صارت فيه الكوارث الطبيعية أكثر فتكًا، فإنّ شبكة الكهرباء في الولايات المتحدة تتقدّم في السن، وصارت أكثر عرضة للتلف بسبب العواصف والضغوط الأخرى. وحتى لو أغفلنا أمر قدم الشبكة، فإنّ الطبيعة المترابطة للشبكة تجعلها عرضة لانقطاعات واسعة النطاق، حيث يعدّ الترابط أمرًا رائعًا لتوصيل الطاقة عبر مسافات كبيرة، ولكنّه أمر محزن عندما تؤدّي مشكلة في أحد الأقسام إلى إعاقة العديد من الأقسام الأخرى بسرعة. فمثلًا، لامس أحد خطوط الكهرباء في ولاية أوهايو فرع شجرة ضخم في عام 2003م، ما تسبّب في فشل متتالٍ أدى إلى تعتيم مساحات شاسعة

من شرق الولايات المتحدة وكندا، ما أثّر في 50 مليون شخص. ويضاف إلى المخاطر المستمرة التي يشكلها الغطاء النباتي، التهديدات الخبيثة من الخصوم الأجانب الذين يرغبون في إلحاق الضرر بالولايات المتحدة، ويرون الشبكة هدفًا رئيسًا لذلك30.

كلّف حاكم نيويورك أندرو كومو Andrew Cuomo وكالات الطاقة بالولاية في أعقاب العاصفة الكبيرة ساندي، بوضع خطة شاملة للاستعداد للكوارث المستقبلية، ومن هذا التفويض تطوّرت "رؤية إصلاحات الطاقة Reforming the Energy Vision (REV)"، وهي من بنات أفكار قيصر الطاقة؛ ريتشارد كوفمان Richard Kauffman التي قدّمها للحاكم كومو.

سعت رؤية إصلاحات الطاقة لبناء المرونة في شبكة الكهرباء في نيويورك من الألف إلى الياء، من خلال إعادة تصميم الشبكة للاعتماد بشكل أكبر على موارد الطاقة الموزّعة، بحيث لن تكون الشبكة التي كانت مركزية في السابق عرضة للأعطال في ضربة واحدة. على سبيل المثال، قد يتمّ ربط مستشفى بالشبكة الرئيسة ولكنه في الوقت ذاته يولد الطاقة ويخزنها أيضًا باستخدام الألواح الشمسية وخلايا الوقود والبطاريات في الموقع، فإذا تسبّبت كارثة في تدمير الشبكة المركزية، فسيظل المستشفى قادرًا على تشغيل معدّاته الحيوية. والأهم من ذلك ستُثبَّت موارد الطاقة الموزّعة بطريقة تجعلها تقاوم الانقطاع. وعلى العكس من ذلك فقد تعطلت العديد من مولدات الديزل التي تعمل على تشغيل مستشفيات مدينة نيويورك عندما ضربها الإعصار ساندي، ما أدّى إلى إخلاء تلك المستشفيات.

وعلى الرغم من أن الحاجة إلى المرونة هي التي ألهمت الهندسة اللامركزية لرؤية إصلاحات الطاقة، إلا أنّه سرعان ما ظهرت العديد من الفوائد الأخرى. من أول هذه الفوائد كانت الوفورات الاقتصادية الهائلة المحتملة من نظام الطاقة الذي يتطلّب فقط هيكلًا لشبكة مركزية، ويمكن أن يخدم معظم الطلب مع موارد الطاقة الموزّعة محليًّا. وقد أقام ريتشارد كوفمان الحجة لإصلاح النموذج التقليدي للشبكة عندما شرح ذلك بالقول: "لقد أنفقنا 17 مليار دولار على النظام الكهربائي في السنوات العشر الماضية، ونحن في طريقنا لإنفاق 30 مليار دولار في السنوات العشر المقبلة. إن مجرد استبدال ما لدينا لا يجعل النظام أكثر ذكاءً أو مرونة"31.

علاوة على ذلك، يمكن لرؤية إصلاحات الطاقة أيضًا أن تجعل نظام الطاقة أنظف، وذلك بفضل ظهور تقنيات منخفضة التكلفة ونظيفة ولامركزية مثل الألواح الشمسية على الأسطح والبطاريات والأجهزة الموفرة للطاقة. وقد اجتمعت هذه الميزات المتنوّعة في أواخر عام 2016م عندما نجحت شركة الكهرباء في مدينة نيويورك؛ كون آديسون Con Edison، في تأجيل إنشاء محطة فرعية بقيمة مليار دولار في دائرة بروكلين، من خلال طلب عروض المناقصات للحصول على طاقة نظيفة وموزّعة من الطاقة الشمسية على الأسطح والبطاريات وتدابير توفير الطاقة32.

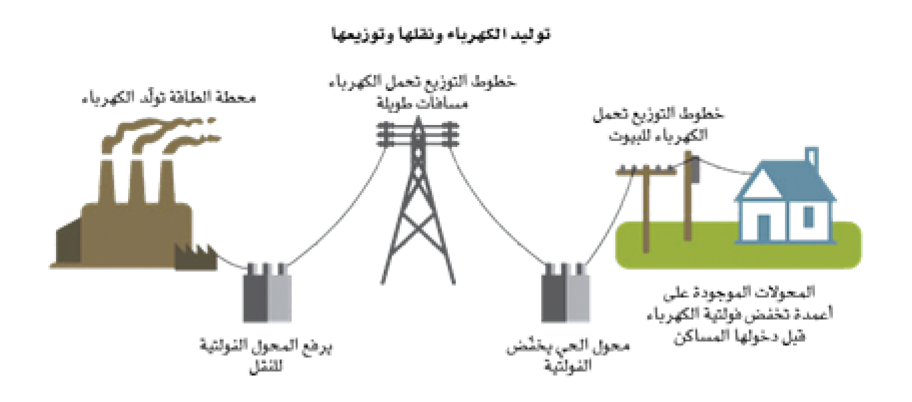
كنت محظوظًا للعمل مستشارًا لريتشارد كوفمان ومكتب الحاكم خلال ذلك الوقت؛ حيث ساعدت في تصميم اللوائح لانتقال نيويورك من نظام طاقة القرن العشرين إلى نظام حديث. أتذكر باعتزاز اجتماعًا واحدًا على وجه الخصوص. كان الفريق يراجع سياسة شاملة جديدة من شأنها تحفيز مرافق الطاقة في نيويورك؛ لدعم موارد الطاقة الموزّعة بدلًا من ضخّ الأموال في خطوط النقل والمحطات الفرعية باهظة الثمن. كانت هذه الوثيقة التنظيمية التي تحمل عنوانًا غير لافت: "المسار الثاني Track Two"، مكتوبة بخط مملّ أحادي المسافة من النوع الذي يمكنك توقّع استلامه من وكالة بيروقراطية. 33 لكن ريتشارد حمل حزمة الورق بحنان، وأعلن للمجتمعين أنّ هذه الوثيقة قد تكون مهمّة لصناعة الطاقة مثل أهمّية إعلان الاستقلال للولايات المتحدة.

في الحقيقة أن الإصلاحات التنظيمية التي تضمنتها الوثيقة هي إعلان الاستقلال عن نموذج القرن العشرين لأنظمة الطاقة؛ فوفقًا لهذا النموذج تدير المرافق شبكة الكهرباء من أعلى إلى أسفل، وهذا النموذج لا يزال يميّز الغالبية العظمى من شبكات الطاقة حول العالم؛ حيث تنتج محطات الطاقة المركزية الكهرباء التي تُنقل وتُوزَّع على العملاء مثلما يضخّ القلب الدم عبر الشرايين، ثم الشعيرات الدموية للوصول إلى أطراف الجسم.

تكمن مشكلة شبكة الطاقة هذه في أنّها مخططة مركزيًّا وغير فعّالة وغبية؛ حيث تحاول المرافق التنبّؤ بأنماط الطلب لسنوات عدّة قادمة عندما تُحدَّد أجزاء الشبكة التي يجب بناؤها. ومع ذلك، غالبًا ما تكون هذه التنبّؤات محفوفة بالأخطاء. ثم تُضخّم المرافق مكوّنات النظام حتى يمكن في أسوأ الحالات -مثلًا، في يوم صيف حار مع طلب مرتفع للغاية على الطاقة لتكييف الهواء- لمحطة فرعية أو خط كهرباء توفير القدر اللازم من الكهرباء الذي يحتاجه العملاء على الفور، حتى لو كانت هذه المعدات غير مستغلة بشكل كافٍ معظم أيام السنة. أخيرًا، تمتلك معظم المرافق معلومات مباشرة قليلة جدًّا عن مقدار الطاقة المتدفّقة عبر شبكة التوزيع؛ فحتى وقت قريب جدًّا عندما بدأت بعض المرافق الأمريكية في طرح العدادات الذكية، لم تكن لديها أيّ فكرة عن مقدار الطاقة التي يستهلكها كلّ عميل إلا بعد أن يقوم قارئ العداد بزيارة شهرية.

هذه الخصائص تجعل شبكة الطاقة الكهربائية أغلى مما يجب أن تكون عليه، وبنيتها التحتية المترامية الأطراف فيها نقاط لا حصر لها من الفشل المحتمل الذي يهدّد النظام بأكمله. وليس لدى المرافق في الوقت نفسه حافز للتخلي عن هذا النموذج، بل إن ما يحدث على العكس تمامًا، وذلك لأن الطريقة الغامضة التي تجني بها المال هي من خلال تحصيل مدفوعات العملاء المتزايدة لتمويل مشاريع البنية التحتية للشبكة، وأخذ حصّة صغيرة من الأرباح لإعادتها إلى المستثمرين، لذلك فإن هذا النموذج يمنح المرافق كلّ الحوافز لمواصلة بناء الشبكة. تستحق الصناعة الآن بالتأكيد الثناء لقدرتها العجيبة على توفير طاقة موثوقة للغاية للبلد بأكمله. وقد أدّى هذا العمل الفذ بالأكاديمية الوطنية للهندسة إلى إعلان أنّ الشبكة الأمريكية هي الإنجاز الهندسي الأكثر إثارة للإعجاب في

القرن العشرين (الشكل 8.3)34. لكن الشبكة المجددة في هذا القرن تستطيع تحقيق أداءً أفضل من ذلك بكثير.



الشكل (8.3): نموذج القرن العشرين للشبكة الكهربائية.
مصدر: إدارة معلومات الطاقة (Energy Information Administration (EIA)).

تهدف رؤية إصلاحات الطاقة بهذه الروح إلى إنشاء شبكة لامركزية وعالية الكفاءة وذكية بشكل أكبر. وفي خروج عن اللوائح الحالية التي تجبر المرافق على دعم موارد الطاقة الموزّعة بوصفها مسألة امتثال، تقدّم رؤية إصلاحات الطاقة للمرافق طرقًا جديدة لكسب المال، وإذا تمكنت من إقناع العملاء بتلبية الحاجات المحلية بفاعلية من حيث التكلفة من خلال التوليد في الموقع، واعتماد أجهزة موفّرة للطاقة يمكن برمجتها لتقليل الطلب عندما تكون الشبكة تحت الضغط، فيمكنها تجنّب إنشاء خطوط كهرباء ومحطات فرعية جديدة باهظة الثمن. ولمواءمة حوافزها مع حوافز العملاء، يجب أن يكون لها الحقّ في خفض التكاليف التي يوفّرها نظام الطاقة.

تهدف رؤية إصلاحات الطاقة أيضًا إلى إنشاء أسواق موزّعة تسمح للعملاء بتداول خدمات الطاقة على المستوى المحلي، بدلًا من سوق طاقة مركزية واحدة بالجملة تحدّد سعر الطاقة في منطقة شاسعة. وتتصور هذه الرؤية أسعارًا ديناميكية لخدمات الكهرباء تتغيّر بناءً على الموقع والتاريخ والوقت، بحيث يتلقى العملاء إشارات أسعار ملائمة بدقّة بناءً على تكاليف النظام التي يتخملونها. على سبيل المثال، تستطيع أسرة لديها نظام بطارية في حيّ فيه العديد من الألواح الشمسية على الأسطح، أن تستفيد من السعر الجاذب لسعة التخزين؛ ما يؤدّي إلى تخزين وفرة من الطاقة الشمسية في وقت الظهيرة؛ لمنع الطاقة من التحميل الزائد على الدوائر المحلية، وإرسال الطاقة المخزنة إلى الشبكة لاحقًا. ونظرًا إلى أنّ معظم العملاء قد لا يرغبون في المشاركة بنشاط في هذه الأسواق المعقدة، فيمكن لمجمِّع طاقة خارجي التدخّل للتداول نيابة عن عملائهم؟ وهذا النهج القائم على السوق سيمكّن من استخدام موارد الطاقة الموزّعة لتلبية حاجات العملاء بكفاءة عالية.

رؤية نيويورك إصلاحات الطاقة ليست الوحيدة في السعي لتحقيق أهدافها؛ فعلى الساحل الغربي تستكشف كاليفورنيا بالمثل خيارات للتحرّك نحو نموذج أكثر لامركزية.35 خارجيًا، كانت المملكة المتحدة رائدة في وضع اللوائح التي أزالت الحوافز المعرقلة التي تلزم المرافق للاستثمار فقط في مشاريع البنية التحتية الرئيسة للشبكة، بدلًا من تلبية حاجات العملاء بأكثر الطرق فاعلية.36 يوجد عدد لا يحصى من المرافق والهيئات التنظيمية الأخرى التي تراقب ما يحدث عن كثب في المناطق التي كانت البادئة في سن هذه الإجراءات، مثل نيويورك؛ لتقييم كيف يمكنها تحديث أنظمة الطاقة الخاصّة بها أيضًا.

جزء أساسي من هذا الجهد هو استخدام التقنية لإنشاء شبكة أكثر ذكاءً. ويرجع السبب في وجود الشبكات المفرطة في البناء اليوم إلى أنّ المرافق لديها قدرة قليلة على تقدير الوقت الفعلي لتدفّق الطاقة والطلبات الفورية للعملاء. ولكن ستكون هناك حاجة إلى بنية تحتية أقلّ بكثير إذا كان بإمكان مشغل الشبكة الذكي -ويستحسن عن طريق البرمجيات المستقلة- إعادة توجيه تدفقات الطاقة، وتوظيف موارد الطاقة الموزّعة لتلبية الطلب المحلي بسرعة.

سيتطلب تحقيق هذا السيناريو معدات متقدّمة منتشرة عبر شبكات التوزيع؛ حيث تستطيع أجهزة الاستشعار الموجودة على خطوط الطاقة وفي المحطات الفرعية توفير معلومات فورية عن تدفّقات الطاقة. وتستطيع إلكترونيات الطاقة تحويل الطاقة بثبات إلى حيث يجب أن تذهب، وإغلاق الأجزاء المحملة بشكل زائد من النظام بسرعة، واستعادة الخدمة على الفور تقريبًا. في هذا الوضع، لن تكون الشبكة أقلّ عرضة للانقطاع الهائل (لأنّها يمكن أن تقطع المشكلات قبل أن تنتشر في مكان آخر) فحسب، ولكنّها ستكون أيضًا قادرة على علاج المشكلات التي تواجهها ذاتيًّا37.

ما علاقة هذا كلّه بالطاقة الشمسية؟ قد يؤدّي الانتقال إلى شبكة لامركزية أكثر ذكاءً إلى تحسين مرونة الشبكة، وتقليل تكاليف الطاقة، وإعطاء العملاء المزيد من الخيارات بشأن طاقتهم. ولكن، هل يمكن أن يساعد هذا بشكل فعّال من حيث التكلفة في نشر كميّات هائلة من الطاقة الشمسية، والتخفيف من تقلبات الطاقة الشمسية بالطريقة نفسها التي يمكن بها توسيع الشبكة؟

يبدو للوهلة الأولى أنّ تطبيق اللامركزية على الشبكة يؤدّي إلى انتكاس الجهود المبذولة لدمج المزيد من الطاقة الشمسية، بدلًا من التقدّم؛ حيث إنّ من شأن الاعتماد بشكل أكبر على مصادر الطاقة المحلية أن يحدّ من حجم منشآت الطاقة الشمسية وموقعها. وبدلًا من مشاريع الطاقة الشمسية البعيدة على نطاق المرافق في المواقع المشمسة، تستطيع الشبكة اللامركزية توظيف الألواح الشمسية المحلية لتزويد المجتمعات المجاورة بالطاقة. ولكن كلّما كان مشروع الطاقة الشمسية أصغر، زادت تكلفته (لأنّ المشاريع الأكبر تتمتع باقتصاديات الحجم)؛ لذا فإن اللامركزية في الشبكة يمكنها تقليل القدرة التنافسية الاقتصادية للطاقة الشمسية، وسيكون من الصعب تحقيق التوازن بين الطاقة الشمسية المتقطعة والطلب المحلي.

لكنّ الأسواق الموزّعة لتسهيل التجارة المحلية في خدمات الطاقة يمكن أن تزيد من القيمة السوقية للطاقة الشمسية الموزّعة؛ فلكي تحافظ الشبكة على مصدر طاقة موثوق به للغاية، فإنّها تحتاج إلى الحفاظ على سمات معيّنة لتلك الطاقة بمستويات دقيقة للغاية، مثل التردّد والجهد. وتستطيع المعدات التي تربط الطاقة الشمسية الموزّعة بالشبكة (المحوّل) أن تساعد في الواقع شبكة التوزيع المحلية على تحقيق تلك الأهداف. 38 وبعد أن وصلت المحوّلات الذكية إلى السوق الآن، فيمكنها أداء هذه الخدمات ومن ثم المساعدة في ضمان طاقة عالية الجودة على المستويات المحلية، وكسب عائدات مولدات الطاقة الشمسية الموزّعة في الأسواق الموزّعة الجديدة. وإذا قلّت فجوة القيمة بين نطاق المرافق والطاقة الشمسية الموزّعة؛ لأنّ الطاقة الشمسية الموزّعة ستكون أكثر قيمة، وتعوّض عن تكلفتها العالية، فإنّ نشر الطاقة الشمسية الموزّعة يمكن أن يبدأ في اللحاق بالطاقة الشمسية على نطاق المرافق.

تتمثّل الطريقة المثلى لنشر الطاقة الشمسية الموزّعة بشكل فعّال من حيث التكلفة في استهداف المنطقة المعتدلة التي تقع بين المنشآت الصغيرة وتلك الضخمة؛ حيث تُعدّ التركيبات الشمسية على الأسطح باهظة الثمن؛ لأنها صغيرة ومتعدّدة الأشكال بحدّ كبير للغاية. وتُعدّ التركيبات أيضًا على نطاق المرافق أرخص بكثير، لكنها في أماكن بعيدة، وتتطلب خطوط نقل باهظة الثمن لتوصيل طاقة؛ حيث توجد في الوسط منشآت شمسية لا تتجاوز بضعة ميغاوات. وهي صغيرة بما يكفي بحيث يمكن وضعها في المناطق المحيطة الفارغة في كثير من الأحيان لمحطة فرعية للشبكة، ما يمكّن من توصيلها بالشبكة مباشرةً بتكلفة إضافية معقولة. لكنها كبيرة بما يكفي للاستمتاع بوفورات الحجم التي تؤدّي إلى خفض تكلفتها. وبالإضافة إلى كونها مواتية اقتصاديًّا، فإن هذه التركيبات (المجهزة بمحوّلات ذكية) تُعدّ حجمًا مثاليًّا للمساعدة في استقرار الشبكة39.

أخيرًا، تستطيع الشبكة اللامركزية الأكثر ذكاءً التي تُحرّكها السوق أيضًا تسهيل التعامل مع عدم موثوقية تركيبات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، سواء أكانت كبيرة أم صغيرة أم بحجم معتدل؛ إذ يمكن لمثل هذه الشبكة تعديل طلب العملاء بحيث تتوافق مع تقلبات إنتاج الطاقة الشمسية. هذا الحل من جانب الطلب لمشكلة العرض المتقطع للطاقة الشمسية هو ما ننتقل إليه بعد ذلك.

عقل خلية الشبكة

في شهر كانون الثاني (يناير) من كلّ عام؛ عندما يلتقي أقوى قادة الأعمال والسياسيين في العالم في المنتدى الاقتصادي العالمي، فإنّ قادة صناعة الطاقة في أمريكا الشمالية يجتمعون في بلدة فيل بولاية كولورادو، في منتدى "دافوس الطاقة". ومثلما سلط منتدى دافوس الضوء بشكل متزايد على الطاقة النظيفة وتغيّر المناخ، فكذلك توسّع مؤتمر بلدة فيل إلى ما وراء صناعة النفط والغاز. وعندما غادر المشاركون المنتدى في اليوم الأخير من قمة عام 2017م إلى منحدرات التزلج، وجدت نفسي

جالسًا على كرسي مرتفع بجوار كبير مسؤولي الاستدامة في شركة مايكروسوفت؛ روب برنارد Rob Bernard، وكانت أمامنا رحلة طويلة.

كنا في أول رحلة بالمصعد مغادرة عند بزوغ الفجر، وكانت درجة الحرارة بالكاد فوق الصفر فهرنهايت، لكنني نسيت أمر البرد حين شارك روب بحماس فكرة مايكروسوفت حول كيفية إمكانية القضاء على جميع انبعاثات الكربون تقريبًا من مراكز البيانات الخاصّة بها، عن طريق تشغيلها فقط خلال فترات وفرة إمدادات الطاقة المتجدّدة على الشبكة.40 "الفرصة هائلة"، قال، وهو يشير بيديه مرتديًا قفازات كبيرة الحجم؛ حيث يستخدم أحد مراكز بيانات مايكروسوفت في ولاية واشنطن وحدها ما يستخدمه نحو 40 ألف منزل من الطاقة.41 ويمكن بمرونة جدولة العديد من عملياته، مثل النسخ الاحتياطي أو فهرسة بيانات عملاء السحابة، لزيادة استهلاك الطاقة الفوري لمركز البيانات أو تقليله. وباستخدام خوارزمية التعلّم الآلي للتنبؤ، واستنادًا إلى السجلات السابقة وبيانات الطقس الحالية، عندما تغمر هذه المولدات المتجدّدة مثل الألواح الشمسية الشبكة بالطاقة، فيمكن لمايكروسوفت تعديل عمليات مراكز البيانات الخاصّة بها لاستهلاك تلك الطاقة الشمسية الزائدة. كانت فكرة روب آسرة للغاية، لدرجة أنني أدركت أنّ أصابعي كانت تتجمّد فقط عندما قاطعت نهاية المصعد محادثتنا. أرشدني بلطف إلى أسرع طريق لمقهىً؛ حتى أتمكن من تدفئة نفسي بشيء من الشوكولاتة الساخنة.

ما اقترحه روب كان مثالًا على إستراتيجية عامّة تسمّى "الاستجابة للطلب demand response"، حيث يعدّل العملاء استهلاكهم للطاقة لمساعدة الشبكة في تحقيق التوازن بين العرض والطلب. كانت الاستجابة للطلب موجودة بالفعل منذ عقود، على الرغم من أنّها ليست في الشكل المطلوب تقريبًا مثل ما تسعى إليه مايكروسوفت وغيرها اليوم. تمتلك المرافق في الوقت الحالي برامج مختلفة يدفعون فيها للعملاء مقابل إيقاف تشغيل مكيّفات الهواء في يوم صيفي حار عندما يؤدّي ارتفاع الطلب إلى إجهاد الشبكة (وهذا على سبيل المثال لا الحصر). تستطيع المرافق في بعض الحالات التحكّم بشكل مباشر في أجهزة العميل لرفع منظم الحرارة بضع درجات،42 وبعض عملاء الطاقة الصناعية الكبار ينظمون بالفعل طلبهم على نطاق أوسع، ويمكنهم في معظم أسواق الكهرباء الرئيسة في الولايات المتحدة، بيع ميغاواط سالبة ("نيغاواتس negawatts ")(*******) من وفورات الطاقة، جنبًا إلى جنب مع ميغاواط من الطاقة التي توفّرها محطات الطاقة التقليدية43.

لكنّ هذه مجرد البداية لاستجابة الطلب؛ فقد أقنعت مجموعة من الشركات المبتدئة مستثمري رأس المال الاستثماري بتمويل الابتكارات المعتمدة على الطلب، لأن العوائد المبكرة منها واعدة أكثر بكثير من الاستثمارات في تقنيات إمدادات الطاقة النظيفة التي آلت إلى الفشل قبل عقد من الزمن.44 ونظرًا إلى اكتساب الشبكات الأكثر ذكاءً القدرة على تسخير مجموعة واسعة من موارد الطاقة الموزّعة وتنسيقها، فيمكن أن تعمل مجموعة أكبر بكثير من معدات العملاء؛ الكبيرة والصغيرة، في تناسق لتعديل الطلب بطريقة تتوافق مع الإمداد المتقطع للطاقة المتجدّدة.

وقد أخذت توجّهات كثيرة تتقارب من أجل تمكين هذا الواقع. أولًا، يشتري العملاء بشكل متزايد الأجهزة التي تتصل بالإنترنت؛ سواء أكانت أجهزة منظّمات حرارة ذكية، أم غسالات، أم مصابيح، أم ثلاجات. ويوصّل عملاء الطاقة الصناعية أيضًا أجهزتهم بالإنترنت، حيث يسير العدد الإجمالي للأجهزة التي تحتوي على تقنية "إنترنت الأشياء Internet of Things" على المسار الصحيح للوصول إلى 50 مليار بحلول عام 2020م، وهو ضعف الرقم الذي كان عليه في عام 2015م.45 في هذا الوضع، يمكن التحكّم بهذه الأجهزة عن بُعد (على سبيل المثال، عبر تطبيق هاتف ذكي)، ما يؤدّي إلى تغيير الاستهلاك الفوري للطاقة, وينطبق الأمر ذاته على المعدات كثيفة الطاقة في المباني الكبيرة، التي يتمّ التحكم فيها بشكل متزايد من خلال أنظمة التحكم في إدارة الطاقة الذكية في المباني.

ثانيًا، تطرح المرافق "عدادات ذكية"، بحيث تقيس استهلاك الطاقة المنزلية بدقة وانتظام بدلًا من قياسها كلّ شهر، ويقيس بعضها الاستهلاك كلّ ساعة أو دقيقة أو حتى ثانية. وتستطيع هذه العدادات الاتصال بالشبكة لمساعدة كلّ من مشغلي الشبكة والعملاء في معرفة الحاجات الأخرى، وتوجد مثل هذه العدادات الذكية حاليًا لدى أكثر من نصف الأسر الأمريكية. وعلى الرغم من أن حجم البيانات الهائل المتدفّق من هذه العدادات قد غمر بعض المرافق التي تجد صعوبة في التعامل معها، إلا أن مرافق أخرى بدأت في إدارة تدفّقات الطاقة على شبكة التوزيع بذكاء لتلبية حاجات العملاء المحليين46.

ثالثًا، تظهر شبكات الاتصالات ثنائية الاتجاه والحلول البرمجية التي يمكن أن تكون مثبّتة على الأجهزة الجديدة لتنسيق الاستجابة الفعّالة للطلب من خلال إدارة موارد الطاقة الموزّعة بالتناغم، ويمكن أن تستخدم الأداة المساعدة هذه الأدوات لتعمل بوصفها مركزًا عصبيًا، وتتحكم مركزيًّا في كلّ شيء على الشبكة، بدءًا من خطوط الطاقة والمحطات الفرعية حتى أجهزة العملاء.

لكنّ خوارزميات التحكم اللامركزية صارت متاحة أيضًا، ويجب أن تعكس اللامركزية في أجهزة الشبكة. وقد تقوم المرافق في المستقبل بتنسيق عملية الشبكة الصغيرة جدًّا، أو على نطاق واسع، وهي مراقب افتراضي في السماء، ترسل إشارات تحكم واسعة عبر السحابة. ولكن العديد من الشبكات المحلية قد تعمل أيضًا على حافة الشبكة، وتربط الأفراد داخل المجتمع المحلي، مثل الحي أو الجامعة. يمكن لخوارزميات البرامج المستقلة على المستوى المحلي تنسيق عمل موارد الطاقة الموزّعة بسرعة لمطابقة العرض والطلب المحليين، والاستجابة للإشارات الملحّة المرسلة من المرفق المركزي. وقد يشبه هذا مستعمرة النمل، حيث يكون صنع السياسات لامركزيًّا، ولكنه قادر على تحقيق أهداف المجموعة بأكملها47.

ماذا يمكن أن يعني عقل الخلية الجديد للشبكة بالنسبة إلى الطاقة الشمسية؟ أحد الاحتمالات المثيرة هو ظهور محطات طاقة افتراضية؛ فإذا كان من الممكن أن تعمل موارد الطاقة الموزّعة في جميع

أنحاء الشبكة بشكل متناغم، فإنّ تأثيرها الجماعي يمكن أن يكون مكمّلًا مثاليًّا لتقطّع الطاقة الشمسية. على سبيل المثال، قد تمتصّ البطاريات الطاقة حين تغمر الطاقة الشمسية الفائضة الشبكة، أو قد تؤدّي مجموعة من منظمات الحرارة وسخّانات المياه والمعدات الكهربائية إلى تقليص الطلب على الطاقة بشكل فوري للتعويض عن انخفاض إنتاج الطاقة الشمسية.48 وتقوم البلدان في جميع أنحاء العالم بالفعل بتجربة هذه الإستراتيجية؛ فللتعامل مع حالات انقطاع التيار الكهربائي المتفاقمة في جنوب أستراليا- على سبيل المثال -شغّل أحد المرافق أكبر محطة طاقة افتراضية في العالم في أديلايد في عام 2017م، وشبكات 1000 بطارية منزلية لتحقيق توازن أفضل بين العرض والطلب.49 (تمتلك تسلا أيضًا خططًا في المنطقة لنشر أكبر نظام بطاريات في العالم؛ للمساعدة في تحسين موثوقية الشبكة).

وعليه، يمكن أن تسهل الشبكة اللامركزية امتصاص كمّيّات كبيرة من الطاقة الشمسية المتقطعة. ومن خلال الجمع بين أفضل ميزات الشبكات المركزية والموزّعة يمكن أن يُدمج المزيد من الطاقة الشمسية. إن توسيع شبكة مركزية -فقد تبلغ ذروتها في شبكة عملاقة- من شأنه أن يخفّف إنتاج الطاقة الشمسية من خلال التجميع الجغرافي، ويربط أيضًا إمدادات الطاقة الشمسية البعيدة بحاجات المدن المتعطشة للطاقة. وفي الوقت ذاته، فإن القدرة على الاستجابة للطلب التي يمكن أن تنشأ من عقل خلية الشبكة اللامركزية ستكمل أنشطة الشبكة العملاقة، وتُعدّل الطلب استجابة لإمدادات الطاقة الشمسية المتغيرة.

بالعودة إلى مايكروسوفت، يعمل المهندسون على سدّ الفجوة بين إستراتيجيات الشبكة الفائقة والشبكات الموزّعة من خلال الجمع بين محطات الطاقة الافتراضية وخطوط النقل الافتراضية. وتتمثّل فكرتهم في تبديل خطوط نقل التيار المباشر العالي الجهد بألياف ضوئية أرخص بكثير يمكن أن تخلق نوعًا مختلفًا من الشبكات الفائقة؛ فهم يرون أنّ شبكة عالمية من مراكز البيانات المترابطة يمكنها تحويل العمليات الحسابية كثيفة الطاقة في جميع أنحاء العالم إلى أيّ مكان يكون فيه إنتاج الطاقة المتجدّدة أقوى في تلك اللحظة. ولذلك عندما تسطع الشمس فوق أوروبا، فستقلّل مراكز البيانات الأمريكية من استهلاكها للطاقة، وتنقل بياناتها إلى أوروبا لمعالجتها وإرسالها مرة أخرى.50 وهكذا، فإن استجابة الطلب على شبكة لامركزية يمكن أن تؤدّي إلى شبكة ضوئية فائقة.

هذه الفكرة بعيدة المنال إلى حد ما، وربما غير قابلة للتطبيق، نظرًا إلى وقت الاستجابة، أو التأخير الذي قد يتراكم من محاولة نقل البيانات حول العالم لمتابعة الشمس. بالإضافة إلى ذلك، تمثّل مراكز البيانات جزءًا صغيرًا (ولكن سريع النمو) من استهلاك الطاقة في العالم. ومع ذلك، فإنّ الرؤية الأساسية سليمة، وهي نهج هجين من شأنه أن يجمع بين قدرة الاستجابة للطلب لشبكة لامركزية مع الترابط لشبكة فائقة. وتُعدّ الشبكة الهجينة الكهربائية، وليست الضوئية، غير بعيدة جدًّا، وقد تمثّل أفضل فرصة للعالم لدمج كمّيّات هائلة من الطاقة الشمسية.

أفضل ما في العالمين

"هل يمكنك سماعي الآن؟... حسنًا!" لخصت هذه الوقفة البليغة بصوت الممثل بول ماركريلي Paul Marcarelli في حملة إعلانية لا تُنسى لشركة فيرايزون للاتصالات اللاسلكية Verizon Wireless، النجاحات العظيمة في القرن الحادي والعشرين لشبكات تغطية الهواتف المحمولة على نطاق واسع. (إذا كان الإعلان يستحضر بدلًا من ذلك تجارب محبطة مع مشغلي الهواتف المحمولة، على الأقل تذكّر أنه قبل عقدين من الزمن لم تكن هناك خدمة في الأصل حتى تشتكي منها). توفّر الشبكات الخلوية بطريقة ما خدمة موثوقة بشكل معقول على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع للعملاء الذين يقومون باتصالات متكرّرة في الوقت نفسه، وكذلك تصفح الويب، والتنقل جغرافيًّا بشكل غير متوقّع. ويشكل هذا النجاح درسًا ملهمًا حول كيفية إنشاء شبكة طاقة هجينة تتواءم جيدًا مع عدم القدرة على التنبؤ.

الطريقة التي تصل بها الهواتف المحمولة إلى شبكة الأبراج الخلوية معقدة وديناميكية؛ ففي أبسط الحالات، سيصل الهاتف الخلوي إلى أقرب برج يوفّر أقوى إشارة، وإذا قام عدد كبير جدًا من المستخدمين باستخدام برج واحد لحدّ الإشباع، فقد يُعاد توجيه هاتفك المحمول إلى شبكة من الأبراج البعيدة؛ حيث تتولى البروتوكولات المتطوّرة اتصالات الهاتف المحمول بين الأبراج عندما تكون في حالة تنقل.

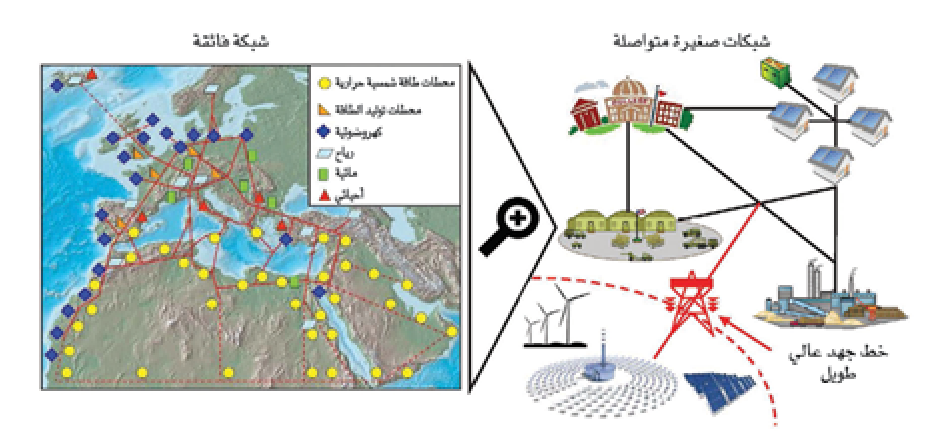
بطريقة مماثلة، وفي رسم تخطيطي لأحد الخبراء لشبكة مختلطة، قد تتصل مجموعة من الشبكات الصغيرة بعضها ببعض ديناميكيًّا بطريقة خلوية، مما يؤدّي إلى إعادة توجيه تدفقات الطاقة للتكيّف مع الازدحام وطلب العملاء الفوري.51 كما أشرت في الفصل الخامس، إنّ الشبكة المصغّرة تعمل على ربط الممنطقة، ربما حي أو جامعة أو مستشفىً أو قاعدة عسكرية أو مبنى مكاتب كبير، وتربط موارد الطاقة الموزّعة التي تنتج الطاقة وتستهلكها. ويمكن أن يتم توصيل هذه الشبكات الصغيرة أيضًا بشبكة مركزية، ولكن سيكون لكلّ منها أنظمة تحكم محلية والقدرة على العمل بشكل مستقل.52 ويمكن لكل هذه الأماكن أن تستمد جزءًا كبيرًا من إمداداتها الكهربائية من منشآت الطاقة الشمسية الموزّعة على نطاق ميغاواط الموجودة في الموقع أو في مكان قريب.

تستطيع الشبكات الصغيرة المصمّمة مع مراعاة المرونة أن تنفصل عن الشبكة الرئيسة في حالة وقوع كارثة، وتستمر في العمل. ويمكن لمثل هذا الاستقلال أيضًا أن يوقف انقطاع الكهرباء المنتشر في مساراته، ويمكن لشبكات صغيرة أن تجعل من الصعب على المتسللين مهاجمة الشبكة بأكملها عن طريق منع الاختراقات المحلية من الانتشار.53 ولتجنب الاضطرار إلى الإفراط في بناء مصادر توليد الطاقة وقدرة الشبكة لضمان أن إمدادات الطاقة يمكن أن تلبي الطلب على مستوى المجتمع المحلي، حتى عندما يكون الطلب مرتفعًا بشكل استثنائي، يمكن ربط هذه الشبكات الصغيرة النموذجية معًا للاتصال ديناميكيًّا بعضها مع بعض وتبادل خدمات الطاقة فيما بينها.

بعد ذلك، ستشكل خطوط النقل لمسافات طويلة في هذا المفهوم العمود الفقري للشبكة المركزية الذي يربط المناطق المجاورة (وحتى الدول) لإنشاء شبكة فائقة.تدعو المقترحات الحالية لإنشاء شبكة فائقة إلى إضافة وصلات التيار المستمر عالي الجهد البينية لتوسيع نطاق الشبكة بشكل كبير والوصول إلى موارد متجدّدة بعيدة. لكنّ هذه المقترحات ستترك -إلى حدّ كبير- الشبكات الأساسية مترابطة بوساطة طاقة التيار المستمر عالي الجهد من دون مساس، وعلى النقيض من ذلك، فإن الشبكة الهجينة ستعيد هندسة الشبكات الأساسية أيضًا.

كثير من شبكات التيار المتردّد الحالية والمضخمة ستكون غير ضرورية، حيث ستُستبدَل بها وصلات مكشوفة بين الشبكات الصغيرة. وإذا كانت الشبكات الصغيرة تعمل على الكهرباء المستمرة (وهي فكرة جيدة بشكل متزايد نظرًا إلى التطوّرات في إلكترونيات طاقة التيار المستمر)، فإنّ الشبكة الهجينة بأكملها ستعمل على التيار المستمر، بداية من خطوط النقل ذات الجهد العالي والمسافات الطويلة حتى الشبكات الصغيرة الخلوية المحلية.54 وهذا سيقلل من خسائر التحويل من التيار المستمر إلى التيار المتردّد، ويقلّل أيضًا من استهلاك الطاقة بفضل الأجهزة الفعّالة للتيار المستمر، ويجلب عددًا لا يحصى من الفوائد الأخرى، مثل احتمال إنشاء خطوط كهرباء تحت الأرض لمسافات طويلة. وعليه، ستكون الشبكة كاملة من الأيام الأولى قبل أن تحلّ شبكات التيار المتردّد من تسلا محلّ تقنية التيار المستمر الخاصّة بشركة أديسون.

يصوّر الشكل (8.4) مخططًا توضيحيًّا لما قد تبدو عليه الشبكة الهجينة. وسيُجمع بين الشبكات الصغيرة التي تستخدم موارد الطاقة الموزّعة بكفاءة؛ لتنظيم العرض والطلب على المستوى المحلي مع وصلات نقل لمسافات طويلة يمكنها نقل الطاقة بين المناطق البعيدة، والوصول إلى موارد متجدّدة بعيدة ولكن متوافرة بشكل كبير. وستحلّ محلّ كثير من الشبكة الحالية المتضخّمة التي تعتمد على البنية التحتية الباهظة الثمن لنقل التيار المتردّد وتوزيعه، بالاعتماد على شبكات ميكروية خفيفة الأصول على النطاق المحلي، وخطوط التيار المستمر عالي الجهد على المستويين الإقليمي والعالمي.



الشكل (8.4): رسم تخطيطي لما قد تبدو عليه الشبكة الهجينة. تمثّل اللوحة اليسرى شبكة عملاقة بحجم القارة (في الصورة: الشبكة الإقليمية الفائقة التي تربط أوروبا وشمال إفريقيا التي اقترحتها ديسيرتيك). تمثّل الرموز مولّدات الطاقة المتجدّدة، وتمثل الخطوط خطوط نقل التيار المستمر عالي الجهد لمسافات طويلة. تُكبّر اللوحة اليمنى الصورة لتكشف عن البنية المجهرية اللامركزية للشبكة الهجينة؛ حيث تتكوّن الشبكة في هذا المقياس من شبكات صغيرة متصلة بموارد الطاقة الموزّعة الخاصّة بها (في اتجاه عقارب الساعة من أعلى اليسار يوجد حرم جامعي وحي ومنشأة صناعية وقاعدة عسكرية). هذه الشبكات الصغيرة تتصل بالبنية العملاقة لخطوط التيار المستمر عالي الجهد التي تربط مناطق متباينة، وتمكن من الوصول إلى موارد متجدّدة بعيدة.
ملاحظة مهمّة: هذا المخطط ليس شاملًا؛ أي إنّ العديد من الموارد الأخرى، مثل محطات الطاقة التقليدية، يمكن توصيلها بهذه الشبكة الهجينة، على الرغم من عدم عرضها بسبب قيود المساحة.
مصدر: تم الحصول على خريطة DESERTEC من ويكيميديا كومنز Wikimedia Commons.

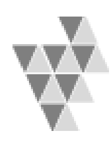
سيكون إنجاز شبكة هجينة ذروة الابتكار النظامي. لكن الحواجز الشديدة تقف في الطريق؛ ففي كلّ مكان تقريبًا، لا ترغب اللوائح السيئة والمرافق المتحفّظة في تجاوز نموذج القرن العشرين لنظام الطاقة، حتى في مناطق داخل الولايات الرائدة مثل نيويورك وكاليفورنيا؛ حيث إنّ التقدّم بطيء، وتوجد أيضًا تفاصيل فنية كبيرة للعمل بها، بما في ذلك معايير لكيفية اتصال الشبكات الصغيرة الذكية بعضها ببعض ومحاكاة الشبكة الخلوية بشكل فعال.55 أما التكلفة فهي قضية أخرى؛ فخطوط التيار المستمر عالي الجهد باهظة الثمن. وعلى الرغم من أنّ الشبكة اللامركزية للشبكات الصغيرة هي إعداد عالي الكفاءة ويتجنّب التكاليف الرأسمالية العالية لمعدات الشبكة التقليدية، إلا أن المرافق التي موّلت الشبكة الحالية أصلًا تحتاج إلى تعويض استثماراتها حتى مع ظهور نموذج جديد للشبكة. وبالتاكيد أنه توجد اعتبارات جيوسياسية، حيث إنّ أجزاء خطوط نقل الكهرباء لمسافات طويلة من شبكة هجينة قد تجبر الدول على الاعتماد على جيران بغيضين.

ولكن مع اتصال المزيد من الطاقة الشمسية بالشبكة، والمرافق الهائلة، قد يضطر المنظمون إلى اتخاذ إجراءات سريعة؛ وستعمل التكلفة دائمًا على إعاقة التغيير. ولكنّ اقتراح القيمة المقنع للشبكة الهجينة يمكن أن يوفّر المال، عن طريق الحدّ بشكل كبير من البنية التحتية للتيار المتردّد المتضخم

اليوم، واستثمارها بدلًا من ذلك في خطوط التيار المستمر عالي الجهد ذات القيمة العالية والبعيدة، ويمكن أن تجذب الشركات والحكومات إلى النموذج الجديد.

قد تكون الدول على استعداد للتواصل مع جيرانها؛ صديقة أو غير صديقة. ونظرًا إلى أنّ الشبكة الهجينة ستزيد من الاتصال الإقليمي وتحكم اللامركزية في إمدادات الطاقة والطلب عليها، فستكون المجتمعات أكثر اعتمادًا على نفسها في حالة حدوث اضطرابات في تدفّقات الطاقة لمسافات طويلة. في الواقع، هذا هو الهدف من الشبكة الهجينة وهو تحقيق أفضل ما في العالمين بين تطبيق اللامركزية على الشبكة وإنشاء شبكات عملاقة. ومن خلال تحسين تنوّع الشبكة بشكل كبير، يمكن أن تكون الشبكة الهجينة أفضل طريقة للتعامل مع تدفّق الطاقة الشمسية المركزية والموزّعة.

هذا كلّه يعني أنّ ماسا وليو؛ صاحبي الرؤى وراء الشبكة العالمية الفائقة، ربما لم يفكرا في الواقع بما يكفي لتصوّر تجاوز الشبكة الفائقة إلى شبكة مختلطة، أو بالأحرى لم يفكرا في التفاصيل الدقيقة كما يجب.



الفصل التاسع لا توجد عصًا سحرية

تمادى إيلون ماسك؛ الرئيس التنفيذي الاستفزازي لشركة تسلا موتورز، هذه المرة إلى الحدّ الذي استهجنه العديد من النقاد بشكل كبير. لقد أعلنت تسلا في 21 يونيو 2016م عن خطط للاستحواذ على سولارسيتي؛ اللاعب المهيمن في سوق الطاقة الشمسية السكنية في الولايات المتحدة. لكنّها شركة ليس لها صلة واضحة بسوق تسلا للسيارات الكهربائية، فانخفضت أسهم شركة تسلا بنسبة تصل إلى 10 بالمئة؛ حيث انتقد المحللون الصفقة، بل إنّ أحد المستثمرين البارزين وصف الصفقة بأنها "مخزية"1.

كانت الرواية السائدة هي أنّ سولارسيتي التي يتطلب نموذج أعمالها مواجهة مبالغ ضخمة من رأس المال لتمويل أنظمة الطاقة الشمسية على الأسطح التي قد يدفعها أصحاب المنازل بمرور الوقت، كانت تعاني من نزيف الأموال، وتحتاج إلى خطة إنقاذ. وبالفعل كانت شركة سبيس-إكس SpaceX التي يقودها ماسك أيضًا، قد أقرضت مئات الملايين من الدولارات لشركة سولارسيتي التي كان يديرها أبناء عمومة ماسك (ليندون Lyndon وبيتر ريف Peter Rive). ولذلك غضب المحللون؛ إذ كان من شأن بيع سولارسيتي لشركة تسلا أن يشكل خطة إنقاذ داخل الأسرة. وكانت تسلا، علاوة على ذلك، تواجه تأخيرات في إنتاج سيارتها الجديدة من طراز 3 ونشرها في الأسواق. وتحطّمت سيارة تسلا موديل S ذاتية القيادة للتو ما أسفر عن مقتل سائقها. وكان السؤال هو: كيف يمكن أن يكون هذا هو الوقت المناسب للاندماج مع شركة محاصرة من صناعة أخرى؟

اتفق ماسك في الواقع مع منتقديه على أنّ التوقيت لم يكن مثاليًا؛ لكنّه قال ساخرًا: إنّ الاندماج "ربما يكون متأخّرًا بعض الشيء".2 ومثلما كان من الواضح أنّ البيع المقترح بدا مخزيًا في نظر المعارضين، فمن الواضخ أيضًا أن دمج الشركتين كان أسهل شيء بالنسبة إلى ماسك في أكثر من عقد من الزمان. في عام 2006م، نشر ماسك على مدوّنته "الخطة السرية الكبرى لشركة سيارات"، واعدًا ببناء سيارة كهربائية باهظة الثمن للمتبنين الأوائل للفكرة، واستخدام العائدات لتمويل تطوير سيارة كهربائية أرخص للعامة، وفي الوقت نفسه إنتاج سيارة رخيصة تعتمد على الطاقة الشمسية عديمة الانبعاثات3.

كان اندماج تسلا/سولارسيتي الآن تتويجًا منطقيًا لهدف واحد شامل؛ فما وحّد الشركتين كان دافع ماسك لتغيير الطريقة التي ينتج بها العالم الطاقة ويستهلكها، وكانت الطاقة الشمسية عنصرًا حاسمًا في تلك الرؤية. لكنها كانت غير مكتملة من تلقاء نفسها؛ فإذا تمّ إقرانها مع تخزين الطاقة الذي تبيعه

شركة تسلا موتورز بسهولة على شكل مركبات كهربائية وبطاريات منزلية، فيمكن أن تلبي الطاقة الشمسية معظم حاجات الطاقة المنزلية فعليًّا.

ولثقته بهذا المنطق، تجاهل ماسك المعارضين لخطط الاندماج الخاصّة به؛ فقد سمع هذا النوع من النقد مرات عدّة. وبالنسبة للرجل الذي يفكر في العقود والقرون المقبلة، لم يكن من المحتمل أبدًا أن تزعجه هستيريا "التجار النهاريين trader-day " المضاربين لغايات الربح السريع قبل إغلاق السوق. وبالإضافة إلى التخطيط لتغيير أنظمة الطاقة في العالم، فقد وضع نصب عينيه بناء سيارات ومركبات فضائية قابلة لإعادة الاستخدام لاستيطان المريخ. أما ما يميّزه عن غيره من الحالمين فهو الإلمام العميق بتفاصيل مشاريعه المختلفة؛ بدءًا من قيادة التحقيق شخصيًّا في عيوب خزانات الوقود فائقة التبريد التي تسبّبت في انفجار صاروخ سبيس إكس في عام 2016م، إلى الإصرار على مواصفات مقابض الأبواب القابلة للسحب في سيارات تسلا الكهربائية لتقليل السحب الديناميكي الهوائي لهذه المقابض4.

لقد أدّى هذا النهج إلى نتائج مذهلة؛ فقد فازت سبيس إكس، من بين العديد من المحطات البارزة الأخرى، بسباق هبوط وإعادة إطلاق صاروخ، وصارت سيارات تسلا شائعة جدًّا، لدرجة أنّ أكثر من 300000 من المشترين المتحمسين وضعوا الودائع في غضون أسبوع من إعلان طراز Tesla Model 3 في عام 2016م.

مع ذلك، كان على ماسك إقناع مستثمريه برؤية المستقبل بالطريقة التي رآه بها، وسيساعد ذلك في استعادة اصطفاف الرأي العام حول شركاته ورؤيته. ولذلك كشف ماسك النقاب عن منتج جديد مذهل مخفي على مرأى من الجميع في أكتوبر 2016، قبل أسبوعين من تصويت المساهمين على الاندماج المقترح.

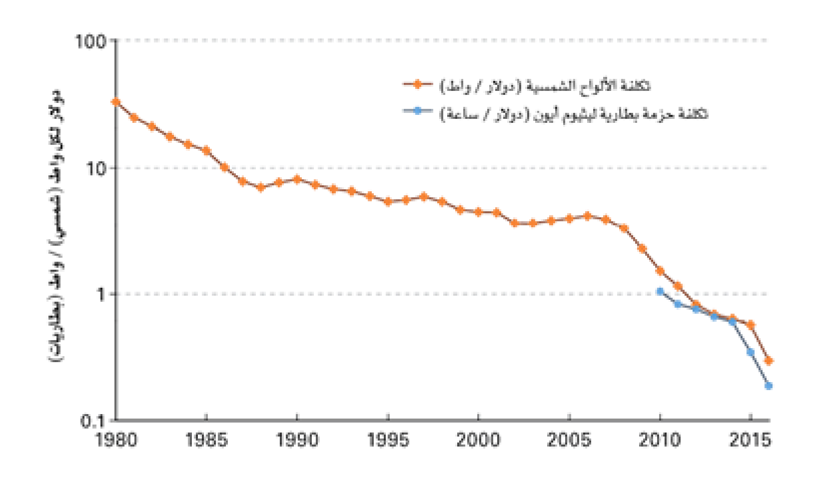
في فعالية في ستوديوهات يونيفرسال تتعلق بالبرنامج التلفازي "ربات بيوت يائسات" Desperate Housewives، قطع ماسك حديثه ليسأل الجمهور عما إذا كانوا قد لاحظوا أي شيء غريب حول المنازل الموجودة في المسلسل. لم يصدق الجمهور؛ فقد اتضح أن المنازل الأنيقة التي تبدو عادية بالنسبة إلى المشاهد، كانت في الواقع تحتوي على ألواح سقف وبلاط يخفي خلايا شمسية من السيليكون الكهروضوئية. والأكثر من ذلك أنّ تكلفة هذه الأسطح الشمسية أقلّ من تكلفة الأسطح العادية (على الرغم من أنّ في هذا قليلًا من المبالغة، بالنظر إلى أنّ أسطح تسلا الشمسية تهدف إلى استبدال موادّ مثل القرميد والبلاط الصخري، التي يمكن أن تكون كلفتها أكثر بعشرين ضعفًا من ألواح التسقيف الأسفلتية العادية). ولتأكيد أطروحته القائلة بأنّ منتجات سولارسيتي تنتمي إلى تحت سقف منتجات تسلا موتورز(أو فوقها)، فتح ماسك بابًا لكراج للكشف عن سيارات تسلا الكهربائية اللامعة وبطارية بَوَروول Powerwall المنزلية الخاصّة بالشركة. كانت اللوحة تصويرًا حيًّا

لرؤية ماسك للمستقبل، حيث تعمل الألواح الشمسية والبطاريات جنبًا إلى جنب للقضاء على البصمة الكربونية للأسرة، كلّ ذلك بأسلوب رائع.

تحوّل النفور إلى تملق، كما هو متوقع، فقد وافق المساهمون بأغلبية ساحقة على الاندماج الذي اقترحه ماسك، وتم تسديد مساهماتهم بسخاء، فارتفعت قيمة الشركة المدمجة على الفور، ووصلت القيمة السوقية بحلول أبريل 2017م، إلى أكثر من 50 مليار دولار (أكثر قيمة من أي شركة سيارات أمريكية).5 وغيّرت تسلا موتورز اسمها بهدوء على موقعها الإلكتروني إلى "تسلا" فقط، ما يشير إلى وصول شركة الطاقة في نهاية المطاف، ولم تعد تسلا مجرد شركة سيارات بعد الآن.

يراهن ماسك بكل شيء على نجاح فرضيّته القائلة إنّ تخزين الطاقة أمر بالغ الأهمّية لتمكين مستقبل يعمل بالطاقة الشمسية. وهو يراهن على وجه الخصوص على تقنية معينة لتخزين الطاقة والمتمثلة في استخدام بطاريات الليثيوم-أيون ion-lithium. وعلى الرغم من أنّ هذه البطاريات كانت تُستخدم بشكل حصري تقريبًا في أجهزة الحاسوب المحمولة وغيرها من الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية قبل عقد من الزمن، إلا أن تسلا تنشرها بشكل جماعي ليس فقط لتشغيل مركباتها، ولكن أيضًا بوصفها حزم بطاريات قائمة بذاتها، بحجم يناسب المنازل الفردية، أو حتى كموارد احتياطية واسعة لشبكة الطاقة.

يعتقد ماسك أنه يستطيع إعادة إنعاش حملة الانخفاضات الكبيرة في التكلفة التي تحقّقت في مجال الطاقة الشمسية، وذلك من خلال زيادة إنتاج بطاريات الليثيوم-أيون؛ لذا بنت تسلا أول أكبر مصنع متخصص متكامل Gigafactory في صحراء نيفادا، الذي سعى لإنتاج المزيد من بطاريات الليثيوم-أيون في 2018م أكثر مما أنتجه العالم بأسره قبل خمس سنوات فقط. أشعل الحديث عن حجم المنشأة سباق تسلح من نوع ليثيو-أيون، حيث قامت الشركات المنافسة- BYD Co. Ltd الصينية وLG Chem وSamsung الكوريتان الجنوبيان بزيادة إنتاج البطاريات تحسّبًا لمصنع جيجا فاكتوري. وقد أكد كلّ هذا النشاط أن توقع ماسك بانخفاض تكاليف البطارية سيكون نبوءة تحقّق ذاتها فقد انخفضت تكلفة حزمة البطارية في عام 2016م، فبعد أن كانت تكلفة البطارية تزيد على 400 دولار لكلّ كيلوواط/ساعة من سعة التخزين، وصلت إلى أقلّ من 200 دولار/كيلوواط ساعة (الشكل 9.1).6



الشكل (9.1): مقارنة بين بطارية ليثيوم-أيون وتكاليف الألواح الشمسية الكهروضوئية. يوضّح هذا الرسم البياني انخفاض تكلفة الألواح الكهروضوئية الشمسية، معبرًا عنها بالدولار لكلّ واط من قدرة توليد الطاقة؛ وحزمة بطارية ليثيوم-أيون، معبرًا عنها بالدولار لكلّ واط/ساعة من سعة تخزين الطاقة. (تكلفة الألواح الشمسية مجرد مكون واحد من تكلفة نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية المركب بالكامل؛ وبالمثل، فإنّ تكلفة حزم البطاريات هي مجرد مكوّن واحد من تركيب بطارية مثبتة بالكامل). المحور الصادي لوغاريتمي.
مصدر: Bloomberg New Energy Finance, industry reports.

إنّ هدف استخدام بطاريات التخزين التي تزيد انتشار الطاقة الشمسية أمر مغرٍ بالفعل؛ وفي الأحوال كّها، فمن شأن الجمع بين التقنيتين إنتاج مصدر طاقة يتّسم بالمرونة، وبذلك يتحرّر من تقطع ضوء الشمس. وإذا صارت البطاريات رخيصة بما يكفي، فستتلاشى معظم عيوب الطاقة الشمسية إن لم تكن كلّها؛ ذلكّ أنّه عند إقران الطاقة الشمسية الكهروضوئية بالبطاريات، فلن تتأثر بعد ذلك بانكماش القيمة الاقتصادية؛ لأنه سيكون من الممكن تخزين الطاقة الزائدة من الألواح الشمسية في الأوقات المشمسة، وبيعها للشبكة خلال فترات الذروة. ولن تُجهد شبكات الطاقة بعد الآن لاستيعاب الطاقة الشمسية المتقطعة ومواءمة العرض والطلب، حيث ستتولى البطاريات ذلك الأمر. وإذا نجح ماسك في الترويج للمركبات الكهربائية في الأسواق الكبيرة، فيمكن أن يؤدّي ذلك إلى إضعاف قبضة النفط على وسائل النقل عن طريق شحن المركبات الكهربائية بوساطة البطاريات التي ستُغطّي عجز الألواح الشمسية.

لسوء الطالع، على الرغم من أنّ إقران الطاقة الشمسية بتخزين البطارية المربوط بالشبكة قد يبدو مرضيًا في أذهاننا، إلا أنه ليس بالعصا السحرية؛ فلا تزال التكلفة الإجمالية للبطاريات الكهروضوئية الشمسية وبطاريات الليثيوم-أيون تتجاوز تكلفة محطة الطاقة التقليدية التي تعمل بالغاز الطبيعي. وإذا كانت هذه التكلفة مجتمعة ستنخفض بسرعة أكبر مما تتنبّأ به التوقّعات الحالية، فستظل بطاريات الليثيوم-أيون غير مناسبة لتخزين كمّيّات كبيرة من الطاقة الشمسية لمدد طويلة-أيام أو أسابيع أو حتى أشهر-إذ تبرز الحاجة إلى مثل هذا التخزين الطويل الأمد بسبب الاختلافات الموسمية في كمّيّة الطاقة الشمسية التي تنعكس على الأرض؛ مثل فصلي الشتاء والصيف.

إن بطاريات الليثيوم-أيون غير مناسبة للتخزين طويل الأمد. ولا ينبغي أن تكون هذه البطاريات مفاجئة، نظرًا إلى أنّها رائعة لتشغيل هاتفك الذكي؛ حيث تتطلّب التطبيقات المختلفة خصائص أداء مختلفة عن تقنية التخزين، مثل مدة دوامها، وكمّية الطاقة التي يمكن تخزينها، ومدى سرعة شحن هذه الطاقة أو تفريغها. توجد مجموعة كاملة من تقنيات التخزين، بما في ذلك العديد من المميزات المختلفة للبطاريات، والتخزين المائي المضخوخ، وتخزين الهواء المضغوط، وغيرها؛ فلكلّ منها مزايا نسبية مختلفة، سواءً تشغيل سيارة كهربائية، أم موازنة الاختلالات اللحظية في شبكة الطاقة بين العرض والطلب، أم تخزين الطاقة على المدى الطويل؛ حيث تبشر التقنيات الجديدة في المختبرات بأداء هذه الوظائف بشكل أفضل من المنتجات الحالية.

زد على ذلك، لا يزال هناك المزيد من طرق تخزين الطاقة لإضافة المرونة إلى ناتج الطاقة الشمسية غير المرن والمتقطع. على سبيل المثال، إذا تمكنت مولدات الطاقة الأخرى من ضبط مخرجاتها بسرعة للتعويض عن تقلب ناتج الطاقة الشمسية، فإنّ هذه القدرة ستكون مكافئة لإضافة تخزين بجزء بسيط من التكلفة.

في الواقع، أظهرت مجموعة متنوّعة من الدراسات الأكاديمية الثرية أنّ أرخص طريقة للتخلص من انبعاثات الكربون من قطاع الكهرباء العالمي هي إحاطة الطاقة المتجدّدة بمزيج من الموارد الأخرى، بما في ذلك التخزين، وكذلك المفاعلات النووية ومحطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري؛ حيث يتمّ التقاط الانبعاثات وتخزينها. إلّا أنّ بعض الأكاديميين وخبراء البيئة يفضّلون استبعاد مزيج الطاقة المتنوّع، ويوصون بدلًا من ذلك بأن تعتمد الدول فقط على الطاقة المتجدّدة والتخزين. وقد يعدّ هذا التقيّد متهوّرًا وكارثيًّا؛ حيث يشير جيسي جينكينز Jesse Jenkins من معهد ماساتشوستس للتقنية إلى أنّ تزويد الولايات المتّحدة بالطاقة المتجدّدة وتخزين البطاريات يتطلب فقط توفير "37.8 مليارًا من أنظمة الجيل الثاني من بطاريات تسلا Tesla Powerwall 2.0 لتخزين الطاقة المنزلية"7.

ولكي تحتلّ الطاقة الشمسية مركز الصدارة، وتحقق هدفها في منتصف القرن المتمثّل في تشغيل ثلث الطلب العالمي على الكهرباء، فستحتاج إلى دواعم متنوّعة فعليًّا. ولسوء الطالع، فإنّ أسواق الطاقة حول العالم غير مُجهّزة لاستيعاب مزيج طاقة متنوّع؛ فبسبب الطريقة التي تعمل بها هذه الأسواق، تعمل مولدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح على خفض أسعار الطاقة بالجملة، وتدفع المولّدات الأكثر موثوقية مثل المحطات النووية إلى إيقاف العمل. وسيتطلب عكس هذا الاتجاه من الأسواق تقييم الأبعاد المختلفة لمستوى المرونة التي ستحتاجها الشبكة بعناية لدمج حصص كبيرة من الطاقة الشمسية، حيث تستطيع الأسواق التي مرت بإصلاحات حثّ المستثمرين على بناء محطات طاقة موثوقة ومرنة لاستكمال الطاقة الشمسية. وبإمكانها أيضًا تشجيع مطوّري التركيبات الشمسية على ترقية الإلكترونيات التي تربط الطاقة الشمسية بالشبكة، بحيث تكون الطاقة الشمسية جزءًا من الحلّ بدلًا من أن تكون المشكلة فقط.

وفي ضوء مرغوبية مزيج الطاقة المتنوّع، وعندما يتباهى ماسك بأنه من خلال حزم بطاريات تسلا التي تدعم المنازل وشبكات الطاقة فإن:"بإمكانك جعل توليد الكهرباء كلّه في العالم متجددًا من خلال الطاقة الشمسية بشكل أساسي"، فهو لا يصف مستقبلًا واقعيًّا معقول التكلفة. ولكنّه عندما أقنع مساهميه بأنّ دمج شركة للسيارات الكهربائية مع شركة للطاقة الشمسية أمر منطقي تمامًا، كان في طريقه إلى شيء واعد أكثر؛ وذلك لأنّ ربط قطاعي النقل والطاقة الكهربائية يعدّ خطوة مهمّة على طريق الوصول إلى الهدف طويل الأجل، المتمثّل باستخدام الشمس في تلبية معظم حاجات البشرية للطاقة بحلول نهاية القرن.

يمكن أن تعمل المركبات الكهربائية بوصفها بطاريات متنقّلة للشبكة في المستقبل، فتقوم بالشحن والتفريغ بذكاء للتعويض عن الطاقة الشمسية المتقطعة على الشبكة من دون أن يلاحظ السائقون ذلك. والخطوة التالية بعد ربط قطاع النقل هي إضافة قطاع التدفئة؛ فالمنازل والمباني التجارية والمنشآت الصناعية بحاجة إلى التدفئة، حيث تستطيع القيام بذلك بمرونة، ومن ثم تستطيع توفير تخزين فعّال لإنتاج الطاقة الشمسية المتقلبة.

يجب ألّا تنتهي الروابط عند هذا الحدّ؛ إذ تستطيع الطاقة الشمسية تلبية الحاجات الملحّة حتى خارج قطاع الطاقة. مثلًا، تستطيع الطاقة الشمسية تشغيل مرافق تحلية المياه لتوفير المياه العذبة التي ستكون نادرة بشكل متزايد مع تسارع تغيّر المناخ. وتستطيع أيضًا توفير الطاقة للاستخدامات الزراعية، وتُحافظ على الطعام الذي كان من الممكن ضياعه. بالإضافة إلى ذلك، تستطيع هذه القطاعات المرتبطة حديثًا -في الواقع- توفير تخزين الطاقة الشمسية عن طريق استخدام فائض الإنتاج بصورة قيّمة.

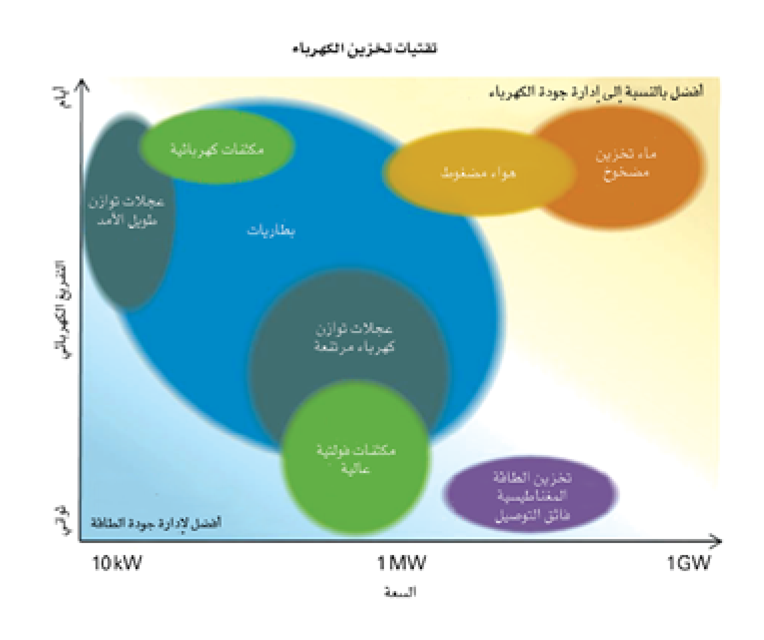
الدرس هنا هو أن الطاقة الشمسية تحتاج إلى تخزين لتنهض، ولكن هذا التخزين يمكن أن يأتي في عدد لا يحصى من الأشكال المختلفة، وقد قدّم إيلون ماسك بعضًا منها للعالم بمهارته المعتادة، وحان الوقت الآن للمبتكرين الآخرين لتقديم أفكار جريئة مماثلة لاستكمال رؤية ماسك.

فئة قائمة بذاتها

على الرغم من كلّ الصخب حول بطاريات الليثيوم-أيون، فقد يكون مفاجئًا للكثيرين أنّ مخزون الطاقة كلّه الموجود اليوم في جميع أنحاء العالم لا يتخذ في الواقع شكل بطاريات كهروكيميائية. وبدلًا من ذلك، فإن مرافق تخزين المياه المضخوخة، التي تضخّ المياه من الخزان السفلي إلى الخزان العلوي لتخزين الطاقة وتحريرها عن طريق السماح بتدفق المياه مرة أخرى إلى أسفل المنحدرات لتشغيل التوربين، تمثّل 95 بالمئة من سعة تخزين الطاقة العالمية. لكن ليس من الواضح ما إذا كانت بطاريات الليثيوم-أيون ستهيمن أو يجب أن تهيمن على مشهد تخزين الطاقة بالطريقة

التي تهيمن عليها الطاقة المائية حتى الآن؛ حيث توجد مجموعة كاملة من تقنيات التخزين المختلفة التي تقدّم حزمة من الحلول لحاجات التخزين المتنوّعة في العالم.

يُعدّ السؤال عن تقنية التخزين الأفضل أو حتى الأرخص، سؤالًا لا معنىً له؛ فهناك العديد من سمات الأداء المختلفة للتخزين، وكلّ منها مهم لتطبيقات مختلفة. يوضّح الشكل (9.2) مشهد فئات تقنيات التخزين المختلفة التي رُسِمت وفقًا لاثنتين من أهمّ خصائص الأداء: سعة الطاقة ووقت التفريغ. تستطيع التقنيات ذات السعة العالية للطاقة أن توفّر زيادة في الطاقة بشكل فوري، وتخزّن التقنيات ذات أوقات التفريغ الطويلة قدرًا كبيرًا من الطاقة. وعليه، يمكن أن توفّر مصدرًا ثابتًا للطاقة لساعات أو أيام أو أكثر. يقع التخزين المائي الذي تمّ ضخّه في الجزء العلوي الأيمن من الرسم البياني في الشكل، ما يشير إلى أنه يمكن أن يوفر قدرًا كبيرًا من الطاقة الآنية، ويحافظ على هذا الإخراج لأوقات طويلة. وهذا هو السبب في أنه يوفّر تخزين الطاقة كلّه تقريبًا في الشبكات حول العالم، ودعم محطات الطاقة الضخمة وتعويض تقلبات الطلب في المدن الكبرى.



الشكل (9.2): نظرة عامة على تقنيات تخزين الكهرباء وخصائصها المختلفة. يقيّم هذا الرسم البياني التوضيحي تقنيات الطاقة من خلال مقدار الطاقة التي يمكنها توفيرها أو تخزينها على الفور (المحور السيني) والمدة التي يمكنها القيام بها، وهو مقياس لسعة تخزين الطاقة (المحور الصادي).
مصدر: إدارة معلومات الطاقة (Energy Information Administration (EIA)).

ومع ذلك، لا يتطلب كلّ تطبيق لتخزين الطاقة سعة طاقة عالية ووقت تفريغ؛ ويمكن، في الواقع، أن يساعد التخزين في استقرار شبكة الطاقة في مجموعة متنوّعة من مقاييس القوّة والوقت. مثلًا لضمان أن تكون كهرباء التيار المتناوب ذات جودة عالية؛ أي لديه الجهد والتردّد المطلوب والمستقر، قد يتحوّل مشغل الشبكة إلى موارد التخزين التي تتفاعل في غضون أجزاء من الثانية

لشحن كمّيّات قليلة من الطاقة أو تفريغها مقابل بضع ثوان؛ حيث تقع هذه الحاجة في الزاوية اليسرى السفلية من الشكل (9.2). وتشمل الحاجات الأخرى سدّ الفجوة بين العرض والطلب، فعندما يزيد الطلب على مولد بطيء، ربما يغذيه الغاز الطبيعي؛ فقد يتطلب هذا النوع من الاستخدام طاقة بمقدار ميغاواط خلال بضع دقائق. ولا تزال توجد حاجة أخرى، تقع في الزاوية العلوية اليمنى من الشكل (9.2)، وهي تحويل الطاقة المولدة في اليوم من وقت الطلب المنخفض إلى وقت الطلب المرتفع، وهذا يتطلب سعة طاقة عالية وساعات من وقت التفريغ9.

وكما أنّ حاجات الشبكة موجودة في جميع أنحاء الخريطة في الشكل (9.2)، فكذلك المناطق الرائعة لتقنيات التخزين المختلفة؛ فبعضها جيد في إنتاج دفعات كهرباء عالية. هذه تشمل دواليب قديمة جيدة هي مجرد كتل تدور وتخزّن الطاقة في شكل دوران ميكانيكي (يوجد أحدها في مقدّمة دراجتك في تمرين النشاط الرياضي). تشمل التقنيات الحديثة المكثفات الفائقة التي تشبه البطاريات، وهي تخزّن الشحنات الكهربائية على طول سطح مموّج للغاية، وتخزين الطاقة المغناطيسية فائقة التوصيل، حيث تُخزّن الطاقة في المجال المغناطيسي الناتج من التيار في ملف من الأسلاك فائقة البرودة والتوصيل.

تأخذ البطاريات الكهروكيميائية التي تخزن الطاقة على شكل روابط كيميائية جزءًا كبيرًا من الشكل (9.2)؛ حيث يتراوح إنتاجها من تدفقات طاقة صغيرة إلى متوسطة الحجم التي يمكن أن تستمرّ من ثوانٍ إلى ساعات عدّة في أيّ مكان؛ لكن المنطقة الزرقاء الكبيرة في الشكل تعيق تنوّع أنواع البطاريات. وبالإضافة إلى بطاريات الأسيد-الرصاص (السيارات) المألوفة وبطاريات الليثيوم-أيون الشائعة بشكل متزايد، توجد مزايا خاصة لبعض البطاريات الأخرى، مثل كبريت الصوديوم وبطاريات التدفق، كالقدرة على تخزين كمّيّات كبيرة من الطاقة وتفريغها في عدة ساعات.

أصبحت بطاريات الليثيوم-أيون تقنية التخزين الأسرع نموًّا والأكثر انتشارًا لأسباب عدة؛ فبالمقارنة مع التقنيات الأخرى المتاحة تجاريًّا، يتمتع الليثيوم-أيون بكثافة طاقة عالية بشكل معقول، حيث إنّه يحزم الكثير من الطاقة لكلّ وحدة من الكتلة. وهذا هو سبب هيمنته على الإلكترونيات الاستهلاكية ثم المركبات الكهربائية، فضلًا عن أن بطاريات الليثيوم-أيون تعدّ أيضًا موثوقة تمامًا في الشحن والتفريغ، ويمكن أن تكون من ناحية أخرى قابلة للاشتعال؛ كاشتعال هواتف سامسونج في أثناء الرحلات الجوية في عام 2016م. ومن الممكن أن يتدهور أداؤها على مدى مئات عدّة من دورات التفريغ.

يحاول الباحثون أيضًا الحصول على أقصى أداء من بطاريات الليثيوم-أيون، ويشمل ملصق "ليثيوم-أيون" فئة كاملة من كيماويات البطاريات التي تُشحن وتُفرَّغ جميعها عن طريق نقل أيونات الليثيوم من جانب واحد من البطارية إلى الجانب الآخر. ولكنّها يمكن أن تختلف في مكوّناتها الدقيقة؛ حيث يستخدم إيلون ماسك وتسلا أحد أقدم التصميمات، فيصنعان أحد طرفي البطارية ("الكاثود")

من النيكل والكوبالت والألمنيوم (NCA)، في حين وجدت نسخة أحدث؛ بطارية النيكل والمنغنيز والكوبالت (NMC) المستخدمة في سيارة تشيفي بولت، ذات المدى 238 ميلًا، والمركبات الكهربائية في السوق الشاملة التي تغلبت على الطراز الثالث من سيارة تسلا الكهربائية في عام2017م.

لا يزال الأمر محيّرًا؛ فهل ستثبت بطاريات الليثيوم-أيون في نهاية المطاف أنّها الحلّ الأفضل لتشغيل المركبات الكهربائية؟ (على الرغم من أنّ الدراسات التي تشير إلى أنّها قاربت على الوصول إلى حدّها الأقصى بالنسبة إلى كثافة الطاقة، وهو أمر غير مشجّع؛ لأنّ المركبات الكهربائية طويلة المدى وذات الأسعار المعقولة ستتطلّب طاقة بطاريات أكثر كثافة).10بالتأكيد، مع أنها لا تستطيع تلبية النطاق الكامل لحاجات شبكة الطاقة؛ وذلك لسبب واحد هو أنها تعاني من انكماش القيمة بسبب نموذجها الخاص. هذه البطاريات هي الأنسب لتوفير دفعات قصيرة من الطاقة المخزّنة لتلبية طفرات قصيرة في الطلب على الطاقة، ولكن كلّما زاد عدد البطاريات المتصلة بالشبكة، قلّ الطلب في أوقات الذروة، ما سيؤثّر في القيمة، ومن ثم يؤدي إلى تدهور قيمة الإضافة الهامشية للبطاريات11.

ستحتاج الشبكة مع زيادة تغلغل الطاقة الشمسية إلى ما هو أكثر بكثير من مجرد التخفيف من الارتفاع المفاجئ في الطلب. ولكن بطاريات الليثيوم-أيون غير مناسبة للعديد من تلك الحاجات؛ لأنّ تركيباتها قادرة على توفير ما يصل إلى أربع ساعات فقط من التخزين؛ أي أقلّ من المدّة اللازمة لمنع التباين في إنتاج الطاقة الشمسية بين النهار والليل أو على فترات زمنية أطول.

قد لا يكون سبب الحدّ الزمني واضحًا للمراقب العادي، فبالنتيجة، تأتي بطاريات الليثيوم-أيون في وحدات معيارية تشبه البطاريات الأسطوانية في جهاز التحكم بالتلفاز عن بُعد.وعليه، قد يبدو من المنطقي افتراض أنّ تكديس ما يكفي من البطاريات معًا يمكن أن يغيّر ناتج مزرعة شمسية كبيرة على نطاق المرافق؛ مثلًا، ستّ ساعات لتلبية الارتفاع المسائي في طلب العملاء. قد تكون مثل هذه الخطوة -في الواقع- ممكنة عمليًا ولكنّها غير مجدية اقتصاديًّا. تتمتع بطاريات الليثيوم-أيون بنسبة ثابتة من الطاقة وكثافة الطاقة؛ فكلّما زاد حجم البطاريات، زادت الطاقة التي يمكنها تفريغها على الفور، وزادت مدة عملها. إن بطارية منشأة تُصمَّم لتفريغ الطاقة خلال مدّة تزيد على أربع ساعات سينتهي بها الأمر إلى عدم الاستفادة من سعة طاقتها بشكل أمثل، كما أنّ نقص الاستخدام يمنع مطوّر المشروع من سداد التكلفة الرأسمالية العالية للبطاريات.

قد يكون نوع مختلف تمامًا من البطاريات (بطارية التدفّق) حلًّا أفضل لتخزين الطاقة الشمسية لساعات عدّة، أو حتى أيام؛ ذلك أنّها تُخزّن الطاقة في شكل سوائل تُشحن وتُفرَّغ عن طريق تبادل الأيونات عبر غشاء. يُضاف إلى ذلك أنّ بطاريات الليثيوم-أيون تتمتّع بميزة مهمّة، وهي أنه يمكن زيادة كمّيّة الطاقة المخزّنة في بطارية التدفّق بشكل لا محدود نوعًا ما، عن طريق

إضافة المزيد من خزّانات السائل من دون تغيير سعة الطاقة. ونظرًا إلى أنّ قدرتها على الطاقة منفصلة عن وقت التفريغ، فيمكن ضبط حجم بطارية التدفق لتخزين الطاقة المتجدّدة المتقطعة بشكل فعّال من حيث التكلفة لفترات طويلة؛ لمساعدة الشبكة في تحقيق التوازن بين العرض والطلب. كما تتمتّع بطاريات التدفّق علاوة على ذلك بعمر أطول بكثير من بطاريات الليثيوم-أيون.

تعدّ بطاريات التدفّق تقنية أقلّ نضجًا في الوقت الحالي، وعليه، فهي أكثر تكلفة من بطاريات الليثيوم-أيون، وهي تعتمد على عناصر نادرة (مثل الفاناديوم).12 يجب أن يكون الاعتماد على المواد النادرة بمثابة إشارة إنذار لتقنية التخزين مع أيّ أمل في دعم كمّيّات هائلة من الطاقة الشمسية حول العالم. (تواجه بطاريات الليثيوم-أيون أيضًا مشكلات في ندرة المواد بسبب اعتمادها على الكوبالت، وهو أحد أغلى المعادن في العالم، ويوجد أساسًا في الكونغو التي مزقتها الحرب)13.

لتجنّب التكلفة العالية والمخاطر الفوضوية لندرة الموارد، يحاول الباحثون صنع بطاريات تدفّق غير مكلفة من مواد وفيرة في الأرض، على الرغم من أنها بعيدة كلّ البعد عن تسويق منتج ما.14 اختار آخرون عكس تصميم بطارية التدفق وبطارية ليثيوم-أيون، لكنهم أكدوا أن بدائلهم تستخدم مواد وفيرة في الأرض. على سبيل المثال، تصنّع شركة آمبري Ambri الناشئة التي انبثقت من معهد ماساتشوستس للتقنية، بطارية معدنية سائلة بإمكانها توفير ساعات عدّة من تخزين الطاقة بشكل فعّال من حيث التكلفة، ولها عمر أطول بكثير من بطاريات الليثيوم-أيون15.

هذه التطوّرات هي خطوات في الاتجاه الصحيح نحو تخزين فعّال من حيث التكلفة يمكن أن يخفّف من التقلبات اليومية للطاقة الشمسية، ولكن من المحتمل أن ذلك سيحتاج إلى مجموعة كاملة من التقنيات الحالية والجديدة لتحقيق ذلك على نطاق واسع. وقد تكون بطاريات الليثيوم-أيون، المكملة بتقنيات طاقة عالية، مثل المكثفات الفائقة، قادرة على تخفيف تقلبات الطاقة الشمسية خلال ثوانٍ أو دقائق (كما هي الحال عندما تمر السحب فوقها، ما يحجب الشمس لفترة وجيزة)، وقد تحوّل أيضًا إنتاج الطاقة الشمسية في غضون ساعتين لمواكبة الطلب بشكل أفضل، ولكن من المحتمل أنّها ستحتاج إلى منتجات مبتكرة مصنوعة من موادّ وفيرة في الأرض؛ لتحويل ناتج الطاقة الشمسية على نطاقات زمنية أطول.

لسوء الطالع، فإنّ الارتفاع الحتمي في حجم تصنيع بطاريات الليثيوم-أيون يهدّد بإغلاق التقنيات الجديدة المنافسة، تمامًا كما أغلقت الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون الأجيال اللاحقة من المواد الشمسية16. في تكرار لتخفيض تصنيع الطاقة الشمسية قبل عقد من الزمن، فإن السباق في الإنتاج بين منتجي بطاريات الليثيوم-أيون يسير على الطريق الصحيح لخفض التكاليف من خلال الحجم الهائل والعرض الزائد، مع إنشاء خندق حول الصناعة لا تستطيع التقنيات الناشئة تجاوزه. وكما أنّه من الخطر المراهنة على حصان شمسي واحد، فهل من الأفضل أيضًا المراهنة على

بطاريات الليثيوم-أيون والمخاطرة بإغلاق التقنيات الأخرى التي يمكن أن تتيح اختراقًا أكبر للطاقة الشمسية؟

على نطاق أوسع، من الخطر المراهنة حتى على فئة تقنيات التخزين بأكملها للقيام ببالمهمة الصعبة كلّها لدمج الطاقة الشمسية. من المؤكد أن التخزين يلعب دورًا مهمًا، ولكنّه ليس الوحيد؛ حيث يتضح هذا القيد عند دراسة التباين الموسمي في إنتاج الطاقة الشمسية الذي سيعاني منه أيّ شكل من أشكال التخزين من أجل تخفيف التكلفة بشكل فعّال. مثلًا، يكون متوسّط الإشعاع الشمسي في الشتاء في أجزاء عدّة من الولايات المتحدة أقلّ من نصف ذلك في الصيف. ونظرًا إلى أنّ طلب العملاء الموسمي قد يعوّض فقط بعضًا من هذا التباين، وربما لا يتمّ التعويض، فإنّ كمّيّات هائلة من الطاقة الشمسية يجب تخزينها في أشهر الصيف وتفريغها في أشهر الشتاء في سيناريو يتّسم بتغلغل كبير للطاقة الشمسية مع غياب خيارات أخرى لموازنة العرض والطلب. قد تكون تكلفة التخزين الموسمي باهظة، وربما أكثر من نظام الطاقة الحالي بأكمله مرات عدّة17.

توجد تقنية واحدة اليوم متاحة تجاريًّا قادرة على توفير التخزين الموسمي: تخزين الطاقة الهيدرولوجية. ولكن من الصعب للغاية في أجزاء كثيرة من العالم، بما في ذلك الولايات المتحدة، إنشاء منشآت مائية جديدة وفعّالة من حيث التكلفة بطريقة صديقة للبيئة. ولذلك، من غير المحتمل إقامة بناء ضخم. وعلاوة على ذلك، يعدّ التخزين الموسمي طريقة غير اقتصادية للغاية لتشغيل مورد التخزين لأنّ تخزين الطاقة في الصيف وتفريغها في الشتاء يؤدي إلى تدوير مورد التخزين لمرة واحدة فقط في السنة، ما يجعل من المستحيل عمليًّا تحقيق إيرادات كافية لتحمّل تكاليف رأس المال.

يعدّ تخزين الهواء المضغوط على نطاق واسع مثالًا آخر على تقنية قد توفّر تخزينًا موسميًّا للطاقة؛ حيث تُستخدم الكهرباء في ضغط الهواء المحيط لتخزينه في كهف تحت الأرض، ثم يُستعاد عن طريق تمديد الهواء لتشغيل التوربينات. ومع ذلك، فإنّ التوافر المحدود لكهوف التخزين الجيولوجي المناسبة يُعيق هذه العملية، وقد اقترح بعض الباحثين والشركات أفكارًا ذات تقنية منخفضة ومثيرة للدهشة؛ كوجود قطار يجر الألواح الخرسانية صعودًا لتخزين الطاقة الكامنة. ويبقى أن ننتظر لنرى ما إذا كانت هذه الأفكار ستطبّق بنجاح18.

هذا كلّه يعني أنّ تقنيات تخزين الطاقة على نطاق الشبكة لا يمكن أن تكون الحلّ الوحيد للتعامل مع تقطع الطاقة الشمسية؛ ذلك أنّ أنظمة الطاقة الناجحة ستتطلّب كلًا من التخزين وطرق أخرى لضبط تدفقات الكهرباء بمرونة. لقد اقترح الفصل الثامن توسيع النطاق الجغرافي للشبكة، وإنشاء شبكة ذكية لا مركزية لتمكين استجابة الطلب، وكلاهما أدوات مهمّة لتسهيل تكامل الطاقة الشمسية. ولكن توجد العديد من الحلول التي يمكن أن تضيف المزيد من المرونة؛ ويتطلب التحويل الحقيقي لأنظمة الطاقة في العالم في هذا القرن الاستفادة منها جميعًا.

الإزالة العميقة للكربون

لقد تعلّمت مؤخّرًا أنّ مثل هذا الاستنتاج المنطقي يمكن أن يتعارض مع السياسة والتفضيلات؛ حيث تعدّ وقائع الأكاديمية الوطنية للعلوم بالولايات المتحدة الأمريكية Proceedings of the (PNAS) National Academy of Sciences of the United States of America واحدة من أكثر المجلات العلمية احترامًا في العالم؛ ففي كلّ عام تُكرّم ست مقالات نموذجية في مجالات متباينة، وقد ذهبت إحدى الجوائز في عام 2015م لمقالة كان مؤلفها الرئيسي أستاذ علوم الغلاف الجوي في جامعة ستانفورد؛ الدكتور مارك جاكوبسون Mark Jacobson، بعنوان "حلّ منخفض التكلفة لمشكلة موثوقية الشبكة مع انتشار بنسبة 100٪ للرياح المتقطعة والمياه والطاقة الشمسية لجميع الأغراض". ادّعت الورقة أنّها وضعت طريقة لتزويد الولايات المتحدة بأكملها بالطاقة باستخدام التقنيات الحالية فقط19. وكان أفضل جزء في البحث أنّ هذا النظام سيكون أرخص من استخدام الوقود الأحفوري، وموثوقًا به تمامًا.

أثار هذا الاقتراح ضجة في وسائل الإعلام الشعبية، لأنّه حاز على حماس مجلة مرموقة. بدا كلّ شيء وكأنه سيناريو حلم حيث ستكون الطاقة من أشعّة الشمس الطبيعية بالكامل والرياح والمياه، من دون الحاجة إلى مفاعلات نووية خطرة، أو التقاط انبعاثات الكربون من محطات الوقود الأحفوري المعقدة وتخزينها.

لسوء الطالع، كان سيناريو الحلم ضربًا من الخيال كما اتضح فيما بعد؛ فقد كانت الورقة مليئة بالافتراضات غير المعقولة، وكان من شبه المؤكد أنّ استنتاجها الرئيس كان غير صحيح؛ فبدلًا من "حلّ منخفض التكلفة"، فإنّ اقتراح الورقة البحثية سيكون مكلفًا ومعقدًا بشكل فلكي؛ سيتطلّب إضافة قدرة توليد كهرومائية تعادل قوة 600 سد مثل سد هوفر على نهر كولورادو، وسيكلف تريليونات الدولارات من الاستثمار في خطوط نقل الكهرباء الجديدة والبنية التحتية لإنتاج الهيدروجين ونقله وتخزينه. وسيتطلب توسيعًا لقدرة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل يفوق بكثير أيّ بناء لمحطات الطاقة شهده العالم على الإطلاق20. وسيتطلب أيضًا تخزين الطاقة الحرارية تحت الأرض، وهي تقنية تخزين للحرارة في المياه الجوفية أو الصخر الصخري تحت الأرض غير مثبتة بأيّ مقياس مُعتبر، تحت "كلّ منزل، ونشاط تجاري، ومبنى مكاتب، ومستشفىً، ومدرسة، ومصنع تقريبًا في الولايات المتحدة"21.

السطر الأخير هذا هو اقتباس من الطعون في المجلة نفسها، كتبته مع عشرين من العلماء الذين أحترمهم في مجالات علوم الطاقة والاقتصاد والسياسة. لقد اعتقدنا أنّ ورقة جاكوبسون أوجدت وهمًا خطيرًا مفاده أنّ تقنيات الطاقة المتجدّدة وتخزين الطاقة اليوم يمكن أن تزيل الكربون بشكل

فعّال من حيث التكلفة من أنظمة الطاقة في العالم. وعلاوة على ذلك، فقد استبعدت الورقة بكل بساطة الخيارات القابلة للتطبيق مثل الطاقة النووية.

في اليوم التالي لنشر ردنا التعقيبي، ذكرت الصفحة الأولى من قسم الأعمال في صحيفة نيويورك تايمز "مصاعب على الطريق إلى مستقبل الطاقة النظيفة"، وأعلنت وسائل الإعلام الأخرى عن "معركة ملكية"(********) و"نقاش علمي مرير" و"واحدة من أكثر المعارك اللاذعة في تاريخ النشر العلمي"،22 واتُهمت أنا وزملائي الذين شاركوا في كتابة التعقيب بأننا قذائف وقود أحفوري. أكّدت هذه الواقعة أنّ موضوع كيفية خفض العالم لانبعاثات الكربون أمر محفوف بالمخاطر سياسيًّا، حتى في المجال الأكاديمي الذي يفترض أنه غير سياسي.

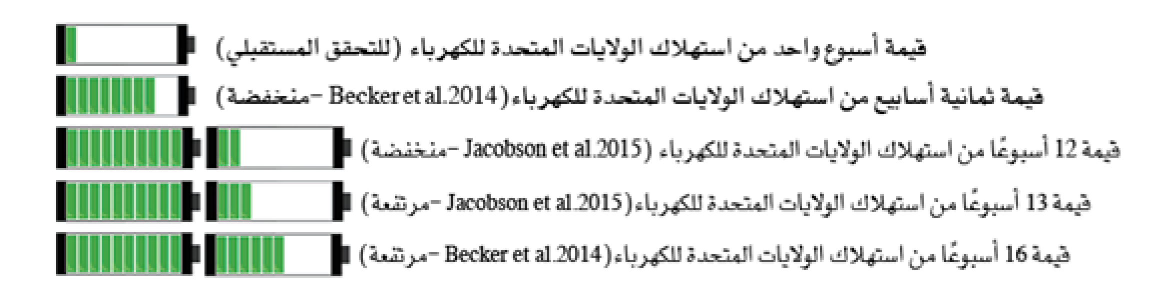
بعيدًا عن السياسة، فإنّ الوصول إلى انبعاثات قريبة من الصفر - أو كما يسميها المطلعون، "الإزالة العميقة اللكربون في قطاع الطاقة يُعدّ شرطًا مسبقًا حاسمًا للحدّ من تغيّر المناخ، وستكون معركة شاقة حتى مع وجود الخيارات المطروحة جميعها على الطاولة. خلص مسح لثمانية عشر نموذجًا مختلفًا للاقتصاد العالمي إلى أنّه لوقف انبعاثات الكربون الجامحة في الغلاف الجوي، يجب أن تنخفض الانبعاثات من الكهرباء بنسبة تتراوح بين 80 و100 بالمئة بحلول عام 2050م. ويجب أيضًا أن تختفي الانبعاثات من المصادر الأخرى جميعها بحلول عام 2100م، 23 24 حيث تتمثّل الحاجة الملحّة لتنظيف قطاع الطاقة في أنّ العديد من الاستخدامات الأخرى للطاقة، بما في ذلك الطيران والشحن والشاحنات الثقيلة وإنتاج الأسمدة، يصعب أو يستحيل إزالة الكربون منها25. ولذلك من الضروري تطبيق التقنيات الحالية والناشئة لخفض الانبعاثات في قطاع الطاقة، مع كهربة أكبر عدد ممكن من الاستخدامات الأخرى للطاقة، ومن بينها سيارات نقل الركاب قدر الإمكان. وسيكون من المهمّ أيضًا العثور على وقود نظيف مستقبلًا؛ ليحلّ محلّ النفط والتخلص من انبعاثات القطاعات الأكثر تلوّثًا. وقد يكون من الضروري حتى معرفة كيفية امتصاص الكربون من الهواء، فبما أنّ قوّة إزالة الكربون تُعدّ الأقلّ صعوبة من بين هذه المهام الضخمة؛ لذا فمن المنطقي البدء من هناك.

إن تعقيد مسار الإزالة العميقة للكربون من قطاع الطاقة هو الحقيقة المزعجة المتمثّلة في أنّ القضاء على الشريحة الأولى البالغة 10 بالمئة من الانبعاثات أسهل بكثير من التخلص من الشريحة الأخيرة. على سبيل المثال، بفضل الاقتصاد المناسب للتحوّل من الفحم إلى الطاقة التي تعمل بالغاز الطبيعي (التي لا تمثل انبعاثاتها سوى نصف انبعاثات الفحم)، انخفضت انبعاثات الولايات المتحدة نقاطًا مئوية عدّة من ذروتها في عام 2007م26. ولكن تقليل الانبعاثات من محطات الغاز الطبيعي -على سبيل المثال عن طريق التقاطها وتخزينها- مكلف للغاية في الوقت الحاضر. وبالمثل يمكن للّوحة الشمسية الأولى على الشبكة أن تحلّ محلّ بعض الطاقة المولّدة من الحفريات من دون الإخلال بالتوازن بين العرض والطلب، لكن الاختراق العالي للطاقة الشمسية يؤدّي إلى ارتفاع شديد في التكاليف لاستيعاب تقطعها.

وعليه، يمكن لأي نظام طاقة أن يعلق بسهولة في الطريق غير المعبدة لإزالة الكربون العميقة. على سبيل المثال، خلصت مراجعة لدراسات إزالة الكربون إلى أنّ الزيادة المطّردة في الطاقة المتجدّدة، والتحوّل من الفحم إلى الغاز الطبيعي، ومجرد الحفاظ على القدرات النووية والطاقة الكهرومائية الحالية، يمكن أن تقلّل انبعاثات قطاع الطاقة بنسبة تزيد على 50 بالمئة27. لكن الحدّ من الانبعاثات بنسبة 80-100 بالمئة يتطلب زيادة في المفاعلات النووية الجديدة، وإعدادات احتجاز الكربون وتخزينه لجميع المصانع الأحفورية تقريبًا، وانفجارًا في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الجديدة28. إذن، من الأهمية بمكان البدء في التخطيط والاستثمار اليوم في نظام طاقة فيه العناصر الصحيحة جميعها؛ للوصول إلى إزالة كربونية عميقة بعد عقود.

هذا النظام يحتاج إلى ثلاث فئات واسعة من إمدادات الطاقة. الأولى، هي الطاقة المتجدّدة، ومعظمها من طاقة الرياح والطاقة الشمسية. ولكن نظرًا إلى أنّ هذه المصادر متقطعة، فإن الحاجة ملحّة إلى فئة طاقة ثانية أكثر موثوقية مستمدة مما يسميه جيسي جينكينز من معهد ماساتشوستس للتقنية موارد "القاعدة المرنة base-flexible". وهذه تشمل المفاعلات النووية ونوعًا من محطات توليد الطاقة بالغاز الطبيعي المعروفة باسم "توربينات الغاز ذات الدورة المركبة cycle gas-combined turbine"، وهي أكثر أنواع محطات الغاز كفاءة. (لكي تسهم محطات الغاز الطبيعي في نظام طاقة خالٍ من الكربون، يجب أن تكون مجهّزة بمعدات احتجاز الكربون وتخزينه). ستضخ المحطات ذات القاعدة المرنة الطاقة باستمرار، ولكنها ستكون قادرة على نحريك إنتاجها إلى أعلى أو إلى أسفل للتعويض عن تقلبات الطاقة المتجدّدة. ومع ذلك، ونظرًا إلى أنّ هذه المحطات قد لا تكون قادرة على ضبط إنتاجها على الفور استجابةً لمولدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المتقلبة، فإنّ فئة ثالثة من الموارد سريعة المفعول ستملأ الفراغ، وتوفّر زيادات مفاجئة في الطاقة في أثناء حدوث ارتفاعات طلب العملاء النادرة. وقد تتضمّن الفئة الثالثة نوعًا آخر من محطات الغاز الطبيعي، "توربين غازي مفتوح الدورة cycle gas turbine-open"، أقلّ كفاءة من توربينات الغاز ذات الدورة المركبة، يمكنها تغيير ناتجها من الطاقة بسرعة أكبر. أما الموارد الأخرى سريعة المفعول فتشمل البطاريات وأنظمة الاستجابة للطلب (ربما يتحكّم فيها عقل خلية الشبكة كما تمت مناقشته في الفصل 8).

لا يمكن لفئتين من هذه الفئات تلبية طلب العملاء بفاعلية من حيث التكلفة من دون الفئة الثالثة. يوضّح الشكل (9.3) التحدّي المتمثّل في محاولة قطع موارد القاعدة المرنة، وإمداد الولايات المتحدة بالطاقة باستخدام مصادر الطاقة المتجدّدة وتخزين الطاقة فقط؛ حيث سيتطلب القيام بذلك بطاريات كافية أو سعة تخزين أخرى لتستوعب ما بين ثمانية إلى ستة عشر أسبوعًا من إجمالي استهلاك الكهرباء في الولايات المتحدة. وتُعدّ هذه كمّيّة هائلة للغاية. وتمتلك الولايات المتحدة حاليًّا مساحة تخزين تعادل نحو ثلاث وأربعين دقيقة من استهلاكها للطاقة، وهذا التخزين كلّه تقريبًا على شكل طاقة كهرومائية يتمّ ضخها.

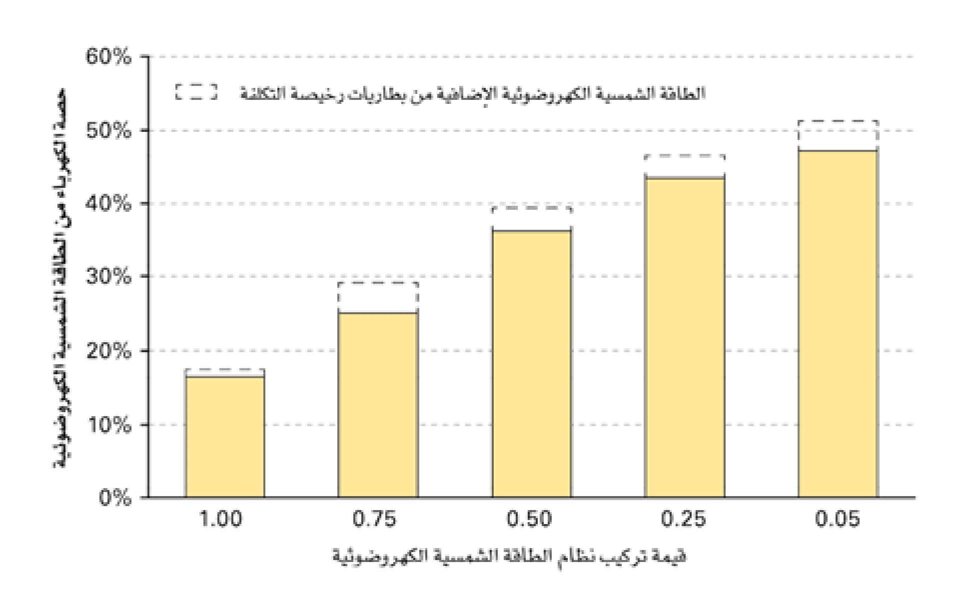


الشكل (9.3): تقديرات سعة تخزين البطاريات اللازمة لتزويد الولايات المتّحدة بالطاقة المتجدّدة بنسبة 100 بالمئة. يمثل الصف العلوي كمّيّة الكهرباء المخزّنة التي ستكون مطلوبة لتزويد أسبوع واحد من الطلب الوطني على الكهرباء في حالة عدم توافر مصادر إمداد أخرى. تعرض الصفوف الأربعة المتبقية التقديرات من كلّ من الدراسات الأكاديمية الأربع لمقدار سعة تخزين الطاقة التي ستكون مطلوبة لضمان تلبية الطلب على الكهرباء في الولايات المتحدة بشكل موثوق، في حالة أن كلّ إمدادات الكهرباء تأتي من مصادر متجدّدة.
المصدر: Jenkins and Thernstrom (2017).

تعدّ إضافة موارد قاعدة مرنة الطريق الأكثر تعقلًا، وينطبق هذا الدرس على جميع أنحاء العالم. على سبيل المثال، خلصت دراسة عن نظام الطاقة في الصين إلى أنّ أرخص طريق لخفض الانبعاثات بنسبة 80 بالمئة بحلول عام 2050م تقتضي استخدام مزيج متساوٍ من الطاقة المتجدّدة والقاعدة المرنة، بما في ذلك المفاعلات النووية ومحطات الفحم المجهّزة لاحتجاز الكربون وتخزينه.29 وعلى الرغم من أن بعض الدراسات، بما في ذلك التحذيرات الدقيقة التي أطلقها المختبر الوطني للطاقة المتجدّدة National Renewable Energy Laboratory (NREL) ومبادرة سياسة المناخ Climate Policy Initiative، تشير إلى أنّ حصّة الكهرباء المتجدّدة يمكن أن تصل إلى 80 بالمئة، إلا أنها تؤكّد أيضًا أن القاعدة المرنة ستظل تؤثّر بصورة أساسيّة. 30، 31 أما الدراسات الأخرى التي تدعي إثبات جدوى الاعتماد على مصادر الطاقة المتجدّدة بنسبة 100 بالمئة، فستجد تكاليف نظام طاقة أقلّ بكثير إذا أزالت قيودها الاصطناعية التي يُسمح فيها بمصادر الطاقة الخالية من الكربون.

لقد فعلنا ذلك بالضبط مع شركائنا في معهد ماساتشوستس للتقنية ومركز إعلام أبحاث التقنية الخضراء green technology media research(GTM Research)؛ حيث قمنا بمحاكاة شبكة كهرباء تكساس من دون استبعاد أيّ مصدر للطاقة بشكل تعسفي، ووجدنا، كما هو متوقع، أنّه كلّما ارتفعت اقتصاديات تغلغل الطاقة الشمسية الكهروضوئية، صارت أرخص (الشكل 9.4). ولكن بصرف النظر عن مدى رخص أسعار الطاقة الشمسية، فإنّ الموارد المرنة الأساسية (وليس الطاقة الشمسية) هي التي توفر غالبية كهرباء النظام. ثم قمنا بعد ذلك بترتيب الوضع لصالح انتشار الطاقة الشمسية، وتخيّلنا سيناريو محتملًا كانت فيه البطاريات أرخص بمقدار أربع مرات عما كانت عليه في عام 2016م (افترضنا تكلفة 150 دولارًا/ كيلوواط ساعة لنظام بطارية مثبت بالكامل، على الرغم من التوقع بأن تكلفة مثل هذا النظام ستتراجع إلى 280 دولارًا أمريكيًا/كيلوواط ساعة بحلول

عام 2040م)32. ومع ذلك، وحتى مع وجود خيار تخزين الطاقة في بطاريات منخفضة التكلفة للغاية، فإنّ نسبة التوسّع الاقتصادي للطاقة الشمسية زادت بمقدار 5 بالمئة فقط، وكانت القاعدة المرنة لا تزال ضرورية. وعليه، فإنّ للبطاريات دورًا محدودًا - وإن كان مهمًّا - تؤدّيه في تمكين زيادة نسبة انتشار الطاقة الشمسية.



الشكل (9.4): نسبة زيادة انتشار شبكة الطاقة الشمسية الكهروضوئية كدالة للطاقة الكهروضوئية وتكاليف التخزين. لكلّ من افتراضات التكلفة المركبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية على طول المحور السيني، تمثل الأعمدة المملوءة نسبة إجمالي الطاقة الكهربائية، المقيسة بالكيلوواط/ساعة (kWh)، التي ستولدها الألواح الشمسية الكهروضوئية. توضّح الامتدادات المنقطة فوق الأعمدة الكمّية الإضافية من الكهرباء التي سيكون توليدها اقتصاديًا باستخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية إذا كان نظام البطارية المثبت بالكامل يكلف 150 دولارًا/كيلوواط ساعة فقط. تم الحصول على هذه النتائج من خلال محاكاة منطقة ذات طقس، وقدرة نقل الشبكة، والطلب على الكهرباء مشابه لولاية تكساس، ومن ثم تحديد أرخص مجموعة من موارد توليد الطاقة لتلبية الطلب بشكل موثوق.

المصدر: Jenkins ,Brown, Sivaram and ,Sepulveda (2017).

سوف يتطلب الأمر مع ذلك ابتكارًا لتقديم محطات مرنة خالية من الكربون، مثل المفاعلات النووية المتقدّمة. والأهم من ذلك، أنّ السبب في هذا ليس لأن المحطات النووية اليوم غير قادرة تقنيًّا على العمل بمرونة كما هو شائع، بل إن هذه المحطات تستطيع في الواقع زيادة إنتاجها وخفضه لمساعدة الشبكة على تحقيق التوازن بين العرض والطلب، كما فعلت فرنسا منذ عقود. 33 لكن المشكلة اليوم في المحطات النووية، المعروفة باسم مفاعلات الماء الخفيف، هي أنها باهظة الثمن، ومعرّضة للانصهار أو الحوادث الأخرى في ظروف نادرة للغاية.

أدى إفلاس شركة وستنجهاوس Westinghouse عام 2017م، وهي الشركة النووية الرائدة التي واجهت تكاليف متزايدة وتأخيرًا في بناء مصانعها، إلى إضعاف احتمالات بناء مفاعلات نووية

جديدة في الولايات المتحدة، لكن التصميمات الأحدث (التي تستند فعليًّا إلى الأفكار الموضوعة على الرفّ منذ عقود)، والمعروفة باسم المفاعلات النووية "الجيل الرابع Generation IV"، يمكن أن تكون أرخص وأكثر أمانًا. ولكن لسوء طالع الولايات المتحدة، فإن الصين وروسيا تقودان السباق لتسويق المفاعلات النووية المتقدّمة، بينما تتخلف أمريكا في الغالب بسبب الاستثمار الحكومي المحدود في البحث والتطوير والقوانين القديمة التي تثبّط تصميمات المصانع الجديدة. 34

وبالمثل، يجب أن تصبح تقنيات احتجاز الكربون وتخزينه أرخص بكثير لتمكين محطات الوقود الأحفوري من توفير قاعدة طاقة مرنة وخالية من الكربون. لقد كان الاتجاه لمشاريع احتجاز الكربون وإجراءات تخزينه المكلفة غير مشجع عبر التاريخ. ويستشهد بعضهم بهذا النمط بوصفه دليلًا على أنه الحلّ الشامل لمشكلات الطاقة المتجدّدة، ويجادلون بأنّ الرهان على التقاط الكربون وتخزينه قد يفتح الباب لاستمرار حرق الوقود الأحفوري. وبعد ذلك، إذا لم تتحقّق تقنية احتجاز الكربون وتخزينه الفعّالة من حيث التكلفة على أرض الواقع، فسيكون العالم حبيسًا في البنية التحتية للوقود الأحفوري.

يشير تطوّران في ولاية تكساس إلى أنّ احتجاز الكربون وتخزينه يجب ألّا يكون مكلفًا إلى حد غير معقول. أولًا، من خلال مشروع بترو نوفا Petro Nova، قامت شركة الكهرباء NRGبإعادة تأهيل أحد أكبر محطات الفحم في الولايات المتحدة محطة (WA Parish Generating) خارج مدينة هيوستن بولاية تكساس- بمعدات لالتقاط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وقد انتهى المشروع في الوقت المحدّد وفي حدود الميزانية المرصودة له، وبضخّ ثاني أكسيد الكربون في الأرض لإعادة النفط المربح إلى السطح، استطاع المشروع أن يولد إيرادات لتغطية تكاليف رأس المال. أما النموذج الثاني فيتمثل في قيام شركة NET Power الناشئة ببناء مصنع تجريبي أكثر تقدّمًا، حيث يقوم ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج الناتج من احتراق الغاز الطبيعي بتشغيل التوربينات، ما يجعل من السهل التقاط انبعاثات الكربون الناتجة. ومع ذلك، لا يزال يتعيّن إحراز المزيد من التقدّم، سواء على صعيد تقنية احتجاز الكربون أم ابتكار استخدامات قيّمة له. وإذا تمكّنت المصانع من جني الأموال عن طريق بيع ثاني أكسيد الكربون لصنع أسمنت المباني أو ألياف الكربون للطائرات والسيارات، على سبيل المثال، فإنّ جاذبية الكهرباء الأحفورية الخالية من الكربون يمكن أن ترتفع بشكل كبير. 35

ومع وجود أساس قوي للطاقة ذات القاعدة المرنة، تصبح كمّيّات الطاقة الشمسية وتخزين الطاقة اللازمة لتحقيق الإزالة العميقة للكربون أكثر قابلية للتتبع. وبالرغم من ذلك، فإنّ استمرار انخفاض التكلفة لكلّ من الطاقة الشمسية والتخزين سيكون مهمًّا لجعل نشرها فعّالًا من حيث التكلفة، فمن الممكن أن يحسّن التخزين من اقتصاديات الطاقة الشمسية. 36 ولذلك، من المنطقي الحديث عن تكاليف توليد الطاقة الشمسية وتخزينها معًا في وقت واحد وليس بشكل منفصل. كما وجدت إحدى الدراسات أنه إذا تضاءلت تكاليف الطاقة الشمسية والتخزين معًا، فإنّ حصّة الطاقة الشمسية في

الغرب الأمريكي يمكن أن تتضاعف ثلاث مرات. إن هذه البدهية منطقية حيث تبدو الطاقة الشمسية المقترنة بالتخزين بالنسبة إلى الشبكة كما لو أنها محطة طاقة مرنة فعليًّا. لذا فإن تكلفتهما مجتمعة ستؤدي إلى المستوى الأمثل للانتشار. وبالعودة إلى القاعدة المرنة؛ فقد وجدت الدراسة نفسها أنه حتى مع أسعار الطاقة الشمسية والتخزين المتدنية، فإن حصة مزيج الطاقة الأكثر فاعلية من حيث التكلفة بلغت 43 بالمئة من الإمداد من أي قاعدة مرنة. 37

الدرس المستفاد هنا هو أنّ الإزالة العميقة للكربون من قطاع الطاقة، وهي شرط أساسي للحدّ من تغيّر المناخ، سيتطلب مجموعة متنوّعة من العوامل؛ إذ إنّ هناك حاجة مإلى كلّ من الطاقة ذات القاعدة المرنة والموارد سريعة المفعول مجتمعين، بما في ذلك تلك التي تخزّن الطاقة، لتمكين الطاقة الشمسية من التألق. لكن، ما يؤسف له هو أن الإزالة العميقة للكربون ليست أحد أهداف السوق الحرة؛ ولذلك صار من الصعب بشكل متزايد على الفئات الثلاث لموارد الطاقة الخالية من الكربون أن تتعايش في أسواق الطاقة الوعرة والمتقلبة.

من الاستيعاب إلى القدرة

يوجد للابتكار المنهجي، بالإضافة إلى تصميم مزيج الطاقة في المستقبل، جانب آخر هو تصوّر الأسواق التي ستمكّن هذا المزيج من الظهور. سرد الفصل الثالث الطرق التي تسبّب بها ظهور الطاقة الشمسية في إحداث فوضى في أسواق الطاقة في جميع أنحاء العالم، من تشيلي إلى ألمانيا؛ ورأينا كيف يؤدّي فائض الطاقة الشمسية إلى دفع السعر المطلوب للكهرباء الناتجة إلى ما دون الصفر، ودفع أنواع أخرى من محطات الطاقة إلى التوقف عن العمل. وفي هذه الأجواء، تكافح محطات الطاقة ذات القاعدة المرنة على وجه الخصوص من أجل البقاء، على الرغم من أنّها ضرورية لتمكين اختراق عالٍ للطاقة المتجدّدة التي أخذت تعاني من تراجع عوائدها في الوقت الحالي.

على سبيل المثال، يتواصل إغلاق محطات الطاقة النووية من ألمانيا إلى الولايات المتحدة، ويرجع السبب في ذلك،، إلى حد كبير، لكونها لم تعد قادرة على تغطية تكاليفها؛ فأسطول المفاعلات النووية الأمريكية،الذي يولّد خمس الكهرباء في البلاد ومعظم طاقتها الخالية من الكربون، معرّض لخطر فقدان نصف مفاعلاته بسبب الإغلاق المبكر بحلول عام 2030م. 38 وتنتج المشكلات الاقتصادية للطاقة النووية من سببين رئيسين (بخلاف سوء إدارة المشاريع)، هما: الغاز الطبيعي الرخيص والطفرة في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وقد أدّى كلا الاتجاهين إلى قلب الطريقة التي أبقت بها أسواق الكهرباء تاريخيًّا المحطات النووية في العمل.

كانت كلّ محطة طاقة في النموذج القديم لسوق الطاقة تقدّم عرضًا لمقدار الطاقة التي يمكن أن تنتجها والسعر الذي كانت مستعدة لبيع شبكة الكهرباء به. وكانت هذه المحطات تعرض بيع

الكهرباء بتكلفة منخفضة لأن توليد الكيلوواط/ساعة التالية من الطاقة فور تشغيل للمحطة لا يكلف الكثير. ولحسن طالع تلك المصانع، فإن السوق يقبل العطاءات بترتيب تصاعدي لتلبية جميع طلبات العملاء. لذلك، بعد قبول العطاءات من المحطات منخفضة التكلفة، مثل المفاعلات النووية، يتعيّن على السوق قبول العطاءات الأعلى تكلفة من مصادر أخرى، مثل توربينات الغاز الطبيعي التي تطلب ثمنًا باهظًا مقابل حرق الوقود الثمين، وتقوم بزيادة الإنتاج لتلبية زيادة الطلب. كما دفعت الأسواق لكلّ محطة طاقة سعر "مقاصة السوق" نفسه؛ أي السعر المدفوع لآخر عرض تم قبوله (مثل السعر العالي لتوربينات الغاز الطبيعي). كانت هذه الممارسة نجدة للمفاعلات النووية لأنّها- على الرغم من التكلفة المنخفضة لإنتاج الطاقة- اعتمدت على عائدات جارية عالية لسداد تكاليف بنائها الباهظة.

لكن الطاقة المتجدّدة الرخيصة والغاز الطبيعي معًا قلبا نموذج السوق القديمة رأسًا على عقب؛ فمع ازدياد تغلغل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تستطيع مصادر الطاقة هذه أن تعرض بيع طاقتها للشبكة من دون تكلفة إضافية؛ لأنّ تكاليف الوقود لديها صفر. وإلى جانب تأثير الغاز الطبيعي الرخيص، تؤدّي هذه المصادر إلى خفض سعر المقاصة في السوق؛ بمعنى آخر، أنمولدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح تتنافس مع الطاقة النووية للحصول على عطاءات منخفضة التكلفة وبشكل مقبول من السوق، ومن يفوز في النهاية يحصل على أجر زهيد فقط، فتفلس بذلك المحطات النووية التي لم تعد قادرة على سداد تكاليفها الرأسمالية.

قد يحدث الأمر ذاته لاقتصاديات مولدات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، باستثناء أنها محمية بموجب سياسة أو هياكل تعاقدية؛ فالحوافز العامة، مثل التعرفة التفضيلية لإمدادات الطاقة المتجددة in tariff-feed في ألمانيا، تدعم الدخل الذي تجنيه مصادر الطاقة المتجدّدة عادة من أسعار السوق المنخفضة. ونظرًا إلى أن معظم الطاقة الشمسية يتم التعاقد عليها بسعر ثابت من خلال اتفاقيات شراء الطاقة طويلة الأجل، فإن مالكي منشآت الطاقة الشمسية يضمنون تغطية تكاليفهم حتى مع ارتفاع أسعار السوق. وقد اختارت بعض الأماكن، مثل ولاية نيويورك، تقديم مدفوعات تحفيزية للمحطات النووية لحمايتها أيضًا من السوق المنهارة. 39 ولكنّ ما يحدث الآن هو أنه يجري تجاهل الطاقة النووية في معظم أسواق الولايات المتحدة الأخرى، بينما تزدهر مصادر الطاقة المتجدّدة.

وعليه، فإن أسواق اليوم تعاني من مشكلة "الأموال المفقودة"؛ فهي لا تستطيع دفع ما يكفي للمحطات ذات القاعدة المرنة، مثل المفاعلات النووية والمحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري (التي يجب في نهاية المطاف التقاط انبعاثاتها وتخزينها)، لجعل المستثمرين يرغبون في بناء المزيد. وبالتأكيد أنه لا يمكن الدفاع عن هذا الوضع إذا كان الهدف تحقيق الإزالة العميقة للكربون.

حاولت بعض السلطات القضائية سد الفجوة المالية المفقودة؛ وقد انقسمت جهودها إلى ثلاث فئات. أولًا، تُلزم ولاية كاليفورنيا (من بين جهات أخرى) المرافق التي تنقل الطاقة وتوزّعها بتوقيع عقود

طويلة الأجل مع مولدات طاقة موثوقة لضمان حصولها على طاقة كافية لتلبية طلب العملاء المتوقع، بالإضافة إلى هامش أمان بنسبة 15 بالمئة. وبهذه الطريقة يتمتع المستثمرون في محطات توليد الطاقة ببعض الأمان طويل الأجل بحيث لا يُسحب البساط من تحتها حين يؤدّي ارتفاع إنتاج الطاقة الشمسية إلى خفض أسعار السوق. ثانيًا، بالإضافة إلى العديد من الدول الأوروبية، مثل المملكة المتحدة، أنشأت معظم الولايات الواقعة على الساحل الشرقي للولايات المتحدة أسواقًا منفصلة تسمى "أسواق القدرة الاستيعابية الكهربائية capacity markets"، تدفع لمولدات طاقة موثوقة للبقاء في حالة انتظار حتى تطلبها الشبكة بشكل عاجل للحصول على الدعم.

تمثل ولاية تكساس الفئة الثالثة، وتشتهر بكونها اتخذت مسارًا منفردًا؛ فهي نموذج للنقاء الاقتصادي في السوق الحرة، وقد حافظت على سوق جملة "للطاقة فقط" يعمل تمامًا كما في الماضي، باستثناء سقف مرتفع للغاية على السعر الفوري للكيلوواط/ساعة من الكهرباء. وبموجب هذا النهج، إذا كانت إمدادات الطاقة شحيحة حقًّا، فيمكن إنقاذ الموقف من خلال بيع بضاعتها مقابل 9000 دولار/ كيلوواط ساعة، وهذه الإمكانية الفاتحة للشهية، حتى لو حدثت مرة واحدة فقط كلّ عام أو حتى أقلّ من ذلك، فهي حافز قوي للمستثمرين لبناء محطات طاقة مرنة. ولكنّ احتمالية أسعار الكهرباء الفلكية قضية خاسرة سياسيًّا في معظم الأماكن- ويجادل بعض الباحثين بأنّ مشكلة الأموال المفقودة ستظلّ قائمة40.

لكلّ من هذه الأساليب أتباعها المتشدّدون، وهناك عقبات في أوروبا تواجه الجهود المستمرة لإنشاء سوق طاقة موحّدة على مستوى القارة الذي يواجه عقبات بسبب وجود ثمانية وعشرين مخططًا مختلفة لسوق القدرة الاستيعابية الكهربائية التي أنشأتها الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي. 41 ويرغب بعض الأعضاء، بما في ذلك ألمانيا، في إلغاء أسواق القدرة الاستيعابية تمامًا، لكنّ بعضهم الآخر -بما في ذلك فرنسا التي لا تشارك ألمانيا هاجس إغلاق المحطات النووية- لم تحدد موقفها بعد. ويجادل كثيرون في أنه من خلال الدفع لمصانع موثوقة بدل انتظار من دون إنتاج الطاقة فعليًّا، فإن أسواق القدرة الاستيعابية تستطيع رفع أسعار العملاء. ويعترض آخرون بأنّ هذا النهج هو نوع من التأمين يستحق الاستثمار، خشية أن يؤدّي انقطاع التيار الكهربائي أو ارتفاع الأسعار إلى تكلفة أكبر على العملاء.

وبصرف النظر عن هذا النقاش الذي لا معنىً له، فإن الخيارات المبتكرة الأخرى تستطيع تحديث أسواق الطاقة، واستيعاب حصّة متزايدة من الطاقة المتجدّدة، وتمويل أساس قوي لقوّة القاعدة المرنة؛ فالأولوية الأولى هي تقليل كمّيّة الاحتياطيات باهظة الثمن اللازمة لاستيعاب عدم القدرة على التنبؤ بالطاقة المتجدّدة. كما تستطيع تقنية تنبّؤ الطقس المتقدّمة المساعدة من خلال تمكين مشغلي الشبكة من التنبؤ بدقّة أكبر بما سيكون عليه إنتاج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح خلال ساعات أو أيام بشكل استباقي، واستدعاء الموارد التعويضية وفقًا لذلك42. إن ظهور "التعلم العميق deep learning"، وهي خوارزميات الذكاء الاصطناعي التي تشغل جهاز أليكسا للتحكم الصوتي

في المنزل، وتتعلم من التجارب السابقة، يمكن أن يجعل توقعات إنتاج الطاقة الشمسية أكثر دقة وبشكل محدّد43.

بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تعمل الأسواق بإيقاع أسرع، وتقليل الفاصل الزمني من ساعة إلى خمس دقائق أو أقلّ بين القرارات المتعاقبة بشأن المولدات التي يجب إرسالها ومقدار الدفع لها. إن أجهزة حاسوب أكثر قوة وشبكات أكثر ذكاءً تجعل هذا التغيير الذي طال انتظاره ممكنًا44. وهذا سيمكّن مشغّلي الشبكة من إرسال مولدات أخرى للاستجابة لتقلبات الطاقة المتجدّدة بشكل أكثر كفاءة، بدلًا من الاعتماد على عكاز القدرة الاحتياطية المفرطة البناء45 .

تتمثّل الخطوة المهمّة الأخرى في إعادة تجهيز أسواق الطاقة؛ بحيث تقدّر القدرة على تلبية حاجات الشبكة، وليس فقط السعة الاسمية لمقدار الطاقة التي يمكن أن يوفّرها المولد. إنّ القدرة الأساسية هي توفير عزم القصور الذاتي. تذكّر من الفصل 3 أنّ مولدات الطاقة التقليدية تعطي القصور الذاتي للشبكة؛ ولذلك إذا تعطل أحد المصانع، فإنّ الدوران المتزامن للمولدات الأخرى يمنع تردّد الشبكة من الانغمار لمدة طويلة للسماح لمصادر الإمداد البديلة بزيادة الإنتاج. لكن الألواح الشمسية لا تنتج الكهرباء من خلال الحركة الدورانية الفيزيائية، وعليه؛ لا توفّر أيّ قصور ذاتي للشبكة، ويمكن برمجة المحوّلات التي تربط الطاقة الشمسية بالشبكة لتوفّر قصورًا اصطناعيًّا، ومع ذلك فهذا يحاكي أثر القصور الحقيقي. وقد وجدت دراسة أجريت في غرب الولايات المتحدة أنّ الطاقة الشمسية ستحقّق اختراقًا أعلى بكثير إذا كانت محطات الطاقة الشمسية على نطاق المرافق جميعها تحتوي على محوّلات ذكية توفّر القصور الذاتي الاصطناعي46 .

في الواقع، بإمكان محطات الطاقة الشمسية العمل بشكل أفضل من محطات الطاقة التقليدية عندما يتعلق الأمر بدعم الشبكة، والتأكد من أنّ نظام الطاقة يعمل ضمن نطاق التردد الضيق والسعات الفولتية47. ومن خلال تقديم مثل هذه الخدمات المساعدة، يمكن أن تكون الطاقة الشمسية جزءًا من الحلّ وليس المشكلة، وقد أوضحت شركة فيرست سولار في عام 2017م، مدى فائدة محطة طاقة شمسية على نطاق المرافق للشبكة. وبالتعاون مع مشغل الشبكة في كاليفورنيا، أثبتت أول محطة للطاقة الشمسية بقدرة 300 ميغاواط قدرتها على التغلب على محطات الغاز الطبيعي التقليدية من خلال تعزيز مستوى تردّد الشبكة بسرعة48. واستطاعت محطة أخرى في ولاية أريزونا دعم الشبكة في منتصف الليل، عندما لم تنتج الألواح الشمسية أي طاقة، لكن إلكترونيات الطاقة المتطوّرة الخاصّة بالمحطة عزّزت الجهد على خط النقل بعد الإغلاق غير المخطط له لمفاعل نووي رئيسي49 . وقد بدأت ولاية كاليفورنيا بالفعل في تعويض محطات الطاقة الشمسية مقابل القدرات المتقدّمة التي تقدّمها؛ وإذا فعلت الدول الأخرى الشيء ذاته، فإنّ المطوّرين يمكن أن يحذوا حذوها، ويبنون محطات شمسية متقدّمة يمكنها تثبيت الشبكة.

بالإضافة إلى تعديلات السوق الموضّحة أعلاه، يمكن للتغييرات الأساسية في تصميم أسواق الكهرباء أن تساعد نظام الطاقة في استيعاب الاستخدام الموسّع للطاقة المتجدّدة المتقطعة. على سبيل المثال، اقترح بعض العلماء تقسيم أسواق الطاقة بالجملة إلى قسمين من أجل منع الموارد ذات القاعدة المرنة والموارد المتجدّدة من التنافس المدمّر. ووفقًا لهذا الاقتراح، يمكن أن تكون السوق الأولى للكهرباء عند الطلب، أو للكهرباء الثابتة من محطات يمكن التحكّم في إنتاجها بشكل موثوق. أما السوق الأخرى فيمكن أن تكون للطاقة المتغيّرة من المولدات التي لا يمكن التنبؤ بها، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، التي لا يمكن ضمان إنتاجها50. يجادل محلّل الطاقة البارز مايكل ليبريتش Michael Liebreich بأنّ فرق السعر بين السوقين، الذي يسميه "فرق السعر النهائي Firm Spread"، سيرتفع بينما يترافق انكماش القيمة مع صعود الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المتغيرة، وسيجتذب هذا الانتشار مصادر موثوقة لقدرة توليد الشركة، فضلًا عن الابتكار لتطوير موارد جديدة ومرنة مثل محطات الطاقة الافتراضية أو تقنيات التخزين51.

لا تزال مثل هذه الأفكار موجودة إلى حدّ كبير على لوحة التصميم، ولكن هذا هو نوع التصميم المبتكر للسوق المطلوبة لضمان تعايش مزيج متنوّع من موارد الطاقة الخالية من الكربون. وفي الواقع من المفترض أن يكون قطاع الطاقة هو القطاع السهل لإزالة الكربون، أما باقي الاقتصاديات، بدءًا من النقل، فتمثل تحدّيات أكثر تعقيدًا.

البطاريات المتنقلة

تتمثل الطريقة الأكثر وضوحًا لتوسيع نطاق إزالة الكربون من قطاع الطاقة إلى قطاع النقل في كهربة المركبات، فمن خلال إبداعات إيلون ماسك وإغراءاته الرائعة، قد يشتري حشد من العملاء المركبات الكهربائية، ويوصلونها بمنفذ كهرباء المرآب، ويستبدلون بالزيت الكهرباء التي تنتجها مصادر خالية من الكربون. إنّه أمر بسيط، أليس كذلك؟

على الأغلب لا؛ فحتى لو كان العملاء يتهافتون على المركبات الكهربائية، وهو أمر لا يزال غير مؤكد، فمن غير الواضح ما إذا كانت الشبكة ستكون قادرة على التعامل معها؛ حيث إنّ أجهزة الشحن من المستوى الثاني، التي يمكنها إعادة شحن المركبات الكهربائية في غضون ساعات قليلة، تضيف ما يعادل طلب الأسرة بأكملها من الكهرباء إلى دائرة توزيع الحي. وهذه الدوائر ليست بالحجم المناسب للتعامل مع العديد من المركبات الكهربائية؛ لأنها تخدم عادة من خمسة إلى عشرة منازل فقط. والأسوأ من ذلك أنّ شحن سيارة تسلا في إحدى محطات الشحن الفائقة التابعة للشركة يمتصّ فجأة قدرًا من الطاقة من الشبكة مثل مئتي وحدة تكييف هواء تعمل في الوقت نفسه. ولذلك تتطلع المرافق بفارغ الصبر إلى ترقيات باهظة الثمن عبر شبكة التوزيع إذا بدأ اعتماد المركبات الكهربائية بالفعل52.

ستكون القصة مختلفة إذا تمكّنت المركبات الكهربائية من دعم الشبكة بدلًا من إجهادها؛ فبعد كلّ شيء من وجهة نظر الشبكة، فإنّ المركبات الكهربائية هي مجرد بطارية متنقلة. وإذا كان من الممكن أن تتضاعف بطاريات المركبات الكهربائية بوصفها مصدرًا لتخزين الطاقة لشبكة الطاقة، فإنّ الـ 50 مليون مركبة الكهربائية التي ستُباع لمشروع بلومبيرج على مستوى العالم في عام 2040م، يمكن أن تعمل على تهدئة المخرجات المتقلبة من الطاقة الشمسية53.

يمكن في الواقع أن يضيف ربط قطاعي النقل والطاقة مزيدًا من المرونة لدمج انتشار عالٍ للطاقة الشمسية، على الرغم من أنّ القيام بذلك لن يكون سهلًا؛ فعلى المدى القريب عندما تتعلم الشبكات الذكية كيفية التخاطب مع المركبات الكهربائية، فإنّها قد تنظم تغييرات صغيرة في مدى سرعة شحن السيارة الكهربائية في أثناء توصيلها بالكهرباء. ويمكن أن يوفر هذا التعاون خدمات إضافية للحفاظ على مستويات الجهد والتردّد في الشبكة من دون أن يلاحظ سائق المركبات الكهربائية أي فرق على الإطلاق. أما على المدى الطويل، فعندما ينزل المزيد من المركبات الكهربائية إلى الطرق وتصبح مشغلات الشبكة أكثر تعقيدًا، فتستطيع الشبكة في الواقع تسخير القدرة الكاملة لبطاريات المركبات الكهربائية لامتصاص الطاقة أو توفيرها حسب الحاجة. وبإمكان المركبات الكهربائية أن تعمل بالتنسيق مع موارد الشبكة الأخرى، مثل البطاريات الثابتة ومحطات الطاقة، بحيث يمكن تخزين الطاقة الشمسية وتفريغها عندما يرتفع طلب العميل54.

النقل ليس القطاع الوحيد الذي يمكن ربطه بقطاع الطاقة لتوفير المرونة؛ فمن الممكن أن يكون ربط قطاعي التدفئة والطاقة طريقة لا تقلّ أهمّية لتمكين اختراق عالٍ للطاقة الشمسية. ولن يكون مثل هذا الربط جديدًا؛ حيث يمكن لمحطات التوليد المشترك الحالية التي تنتج الطاقة والحرارة، أن تخدم المجتمعات ذات الكثافة السكانية العالية، فضلًا عن المرافق الصناعية مثل المصانع الكيماوية والمصافي ومصانع الورق التي تتطلب كلًّا من الكهرباء والحرارة. يُعد التوسّع في التوليد المشترك للطاقة إحدى الطرق لتسخير ضوء الشمس لتلبية الطلب على الحرارة. وعلى الرغم من أنّ معظم التوليد المشترك للطاقة اليوم يعتمد على حرق الوقود الأحفوري، إلا أنه يمكن تشغيله بوساطة المجمعات الحرارية الشمسية. في الواقع، أثبتت المشاريع التجريبية من الدنمارك إلى المملكة العربية السعودية جدوى استخدام الطاقة الشمسية الحرارية لدفع التوليد المشترك للطاقة والحرارة؛ حيث نُقلت الحرارة في هذه المشاريع من مرافق التوليد المشترك إلى شبكات تدفئة المناطق التي تربط منازل المجتمع ومبانيه. ويمكن أن توفر الحرارة بشكل أكثر كفاءة من السخانات الفردية55.

بالإضافة إلى الجمع بين إنتاج الحرارة والطاقة من خلال التوليد المشترك للطاقة، من الممكن إدارة الطلب على الحرارة بطرق من شأنها تخفيف كمّيّة الكهرباء التي توفّرها المرافق للعملاء على مدار اليوم؛ حيث تتميّز المضخّات الحرارية الكهربائية الجديدة وسخانات المياه الكهربائية بكفاءة عالية في تسخين المساحات والمياه، سواء أكانت للمنازل الفردية أم لشبكات تدفئة المناطق. وبإمكان الشبكة الذكية المتصلة بهذه الأجهزة تشغيل السخانات عندما يكون الإمداد بالكهرباء مرتفعًا،

فيُسخّنالغرفة أو خزان الماء الساخن مسبقًا بالأساس تحسبًا للحاجة، بدلًا من انتظار طلب العملاء للتدفئة لاحقًا، عندما تكون الطاقة الشمسية غير متاحة56.

وفي الواقعأنه مثلما كانت الحال مع ربط قطاعي النقل والطاقة، فإن ربط قطاعي التدفئة والطاقة يمكن أن يوفر بطارية كبيرة أخرى لتخزين الطاقة الشمسية المتقطعة في شكل هواء ساخن وماء، وسيؤدّي دمج هذه القطاعات الثلاثة إلى زيادة مرونة نظام نقل الطاقة والحرارة المشترك. 57 إن كهربة المركبات وأجهزة التدفئة هي إحدى الطرق لتحقيق ذلك، وإذا ما أصبحت تقنية فصل المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية، التي ناقشناها في الفصل السابع، قابلة للتطبيق تجاريًا، فإنّ الطاقة الشمسية يمكن أن تقود اقتصاد الهيدروجين الذي من شأنه أيضًا ربط قطاعي النقل والتدفئة.

وإدراكًا لمثل هذه الاحتمالات، فقد أصدرت إدارة الرئيس باراك أوباما قبل مغادرته منصبه، خريطة طريق طموحة بعنوان "إستراتيجية منتصف القرن للولايات المتحدة للإزالة العميقة للكربون"؛ وتوقعت أنه من أجل تقليل انبعاثات الكربون على مستوى الاقتصاد في الولايات المتحدة بنسبة 80 بالمئة بحلول عام 2050م، فإن 60 بالمئة من الأميال التي تقطعها المركبات يجب أن تكون باستخدام الكهرباء أو الهيدروجين، ويجب أن تمدّ الكهرباء غالبية طاقة التدفئة للمساكن وتسخين المياه58.

قدّم الفصل 8 مفهوم كيف يمكن للروابط بين شبكات الكهرباء في المناطق المختلفة لتشكيل شبكة عملاقة أن تزيد من الانتشار المحتمل للطاقة الشمسية. وقد جمع هذا الفصل بين قطاعات الكهرباء والنقل والتدفئة. وتضيف هذه الروابط كلّها مرونة إلى نظام الطاقة الكلي، ما يجعل من الممكن إدارة الاقتصاد من الطاقة الشمسية المتناثرة، لكن الفوائد المحتملة للتوصيل البيني لا تنتهي عند هذا الحدّ؛ حيث توفّر التفاعلات مع العمليات خارج قطاع الطاقة اليوم طرقًا إضافية لقطاع الكهرباء لللتعامل مع تقطع التيار الكهربائي.

ما وراء الطاقة

في يوم 31 يوليو 2012، الذي كان يومًا صيفيًا جافًا غير معتاد، ضرب الهند أكبر انقطاع كهربائي في تاريخ البشرية؛ ولم يحصل نحو 700 مليون شخص على الكهرباء (وإذا أضفنا هذا الرقم إلى عدد الأشخاص الذين لا تصلهم الكهرباء أصلًا فذلك يعني أنّ أكثر من مليار هندي كانوا من دون كهرباء في ذلك اليوم). مَن الجاني؟ إنها مضخّات الري المتصلة بالشبكة.

كانت الأمطار الموسمية المتأخّرة قد دفعت الملايين من المزارعين إلى تشغيل مضخّاتهم بسرعة لامتصاص المياه الجوفية من أعماق الأرض لري محاصيلهم، وكان الجمع بين الارتفاع الحادّ في الطلب على الكهرباء وشبكة الكهرباء الهندية المتداعية أكثر من قدرة النظام على التعامل معه.

كانت هذه المشاهد تذكيرًا صارخًا بأنّ أنظمة الطاقة والمياه والغذاء متشابكة بشكل لا يمكن فصله، وأن حاجات قطاعي الغذاء والمياه يمكن أن تزيد الطلب على قطاع الطاقة. ومع ذلك، بإمكان الإدارة الذكية لهذه الاتصالات أن تزيد من مرونة التشغيل لكلّ قطاع، وتخفّف الضغوط التي يضعها بعضها على بعض. في الحقيقة أنه إذا ما أديرت الأمور بطريق صحيحة، فإنّ زيادة الربط بين الطاقة والمياه والغذاء توفّر طريقة أخرى لاستيعاب حصّة متزايدة من الطاقة الشمسية المتقلبة، واستخدام هذه الطاقة بشكل جيد.

بدءًا بالماء، ستواجه البلدان في جميع أنحاء العالم بشكل متزايد ندرة المياه مع نمو السكان وتغيّر المناخ. وبالفعل يتطلب إنتاج المياه العذبة ونقلها استهلاكًا هائلًا للطاقة، ولا يوجد مكان للتدليل على هذا أكثر من الشرق الأوسط الجاف، حيث يأتي جزء كبير من إمدادات المياه العذبة في المنطقة من تحلية مياه البحر- وهي تقنية تستهلك الطاقة بشكل كثيف؛ لدرجة أنّها تستهلك ما بين عُشر إلى ثلث الكهرباء المنتجة في دول الخليج العربي59.

يمكن أن توفر محطات التحلية هذه المرونة للشبكة لاستيعاب حصة عالية من الطاقة الشمسية. ومن خلال تعديل إنتاجها، تستطيع محطات تحلية المياه تعديل طلبها على الكهرباء، والعمل أكثر عندما تكون الشمس مشرقة وأقلّ عندما لا تكون كذلك. وعليه، يمكن الاستفادة من الطاقة الشمسية الزائدة خلال النهار. هناك حدود اقتصادية لمدى المرونة التي يمكن أن تعمل بها محطات التحلية، فإذا كانت تعمل بأقلّ من الإنتاج الكامل لمدّة طويلة جدًّا، فإنها ستكافح لكسب عائد كافٍ من مبيعات المياه لتغطية تكاليف رأس المال. لكنّها يمكن أن تكون، بالتأكيد، جزءًا إضافيًا من الحل لبناء شبكة مرنة تعمل بالطاقة الشمسية60 ؛ حيث يمكن أن تكون المياه الرخيصة أكبر فائدة؛ ولذلك تسعى المملكة العربية السعودية لخفض تكلفة المياه إلى أكثر من 80 بالمئة من خلال الاستثمار بكثافة في تحلية المياه بالطاقة الشمسية61.

يمكن أيضًا أن تستفيد أي تقنيات جديدة محتملة لتحلية المياه من الحرارة المهدورة من أي محطة للطاقة الشمسية المركزة، ما يحسّن اقتصادياتها مقارنة بمحطة الطاقة الشمسية المركزة التي تنتج الكهرباء فقط. إنّ أكثر تقنيات تحلية المياه شيوعًا اليوم - التناضح العكسي الذي يدفع المياه المالحة من خلال أغشية ترشيح- تعمل بالكهرباء، لكنّ تحلية المياه بالتقطير متعدّد الأثر effect-multiple distillation desalination، حيث تُستخدَم الحرارة في تبخير المياه على مراحل متعدّدة تاركة الملح وراءها، يمكن أن تصبح تنافسية من حيث التكلفة إذا تقدّمت التقنية. ومن الممكن أن يؤدّي الجمع بين هذه التقنية مع الطاقة الشمسية المركزة إلى جعل المياه العذبة أرخص في منطقة الشرق الأوسط العطشى62 .

ماذا عن الطعام؟ إنّ انقطاع الكهرباء في عام 2012م الذي حدث في الهند عندما طغى ضخ المياه في القطاع الزراعي على الشبكة، يسلط الضوء على الطريقة التي يمكن أن يؤدّي بها الربط السيئ

للإدارة بين قطاعي الطاقة والزراعة إلى كارثة، وقد يكون من المنطقي في هذه الحالة فصل الطلب الزراعي على الريّ عن شبكة الكهرباء المتهالكة في الهند.

يُعد ضخ الري تطبيقًا مثاليًا للطاقة الشمسية الموزّعة؛ لأنه لا يتطلب مصدر طاقة ثابتًا وموثوقًا للغاية، ويمكنه بدلًا من ذلك تحمّل ناتج الطاقة الشمسية المتطاير؛ فإذا شُغّلت مضخّات الري الخاصّة بهم بوساطة الألواح الشمسية، فلن يحتاج المزارعون إلى توصيلها بالشبكة.

سيكون لاستخدام الطاقة الشمسية فوائد رئيسة عدة. أولًا، من شأن عدد أقلّ من المضخّات المتصلة أن يقلّل الطلب على شبكة الطاقة المرهقة. ثانيًا، يمكن أن تحدّ مضخّات الري التي تعمل بالطاقة الشمسية من ممارسات الضخ المهدورة؛ حيث يتلقى المزارعون في الهند الكهرباء المدعومة من الشبكة، ما يحفزهم بشكل عكسي على تشغيل مضخّاتهم في كثير من الأحيان، واستنزاف إمدادات المياه الجوفية. في الواقع، الهند هي أكبر مستخدم للمياه الجوفية في الأغراض الزراعية في العالم، وإذا صُمِّمت مضخة الري الشمسية لضخ كمّيّة مستدامة فقط من المياه، فيمكنها الحفاظ على إمدادات المياه الجوفية بشكل أفضل. (ومع ذلك، إذا استمرت تكاليف الطاقة الشمسية في الانخفاض، فقد تؤدّي أنظمة الري الشمسية الضخمة إلى الإسراف في الضخ). وقد شرعت الحكومة الهندية في برنامج طموح لتغيير 26 مليون مضخّة ري بالمياه الجوفية إلى مضخّات تعمل بالطاقة الشمسية63.

يهدف مشروع تجريبي مخطط له في ولاية كارناتاكا جنوب الهند، إلى تسخير ضوء الشمس لتوفير الكهرباء والغذاء والمياه للمجتمعات المجاورة. وستكون الخطوة الأولى هي تركيز الإشعاع الشمسي بالمرايا لتوليد البخار الذي سيحرك بعد ذلك توربينًا لتوليد الكهرباء، وستُستخدَم الحرارة المهدورة في تقطير الماء، وتوفير التبريد لحفظ الطعام64 . إلى حد ما، فإنّ الماء المقطر والأغذية المحفوظة هي تقنيات تخزين، وتحويل ضوء الشمس سريع الزوال إلى شكل أكثر ديمومة يمكن استهلاكه عند الحاجة.

لا تعدّ أيّ من تقنيات التخزين هذه جاذبة مثل حزم البطاريات التي عرضت في برنامج "ربات بيوت يائسات" الذي مر الحديث عنه، والموضوعة تحت الأسطح الشمسية التي ينتجها إليون ماسك. لكنها مع ذلك أجزاء مهمّة لحلّ لغز كيف يستطيع العالم تسخير ضوء الشمس ليس لتلبية حاجاته من الطاقة فحسب، ولكن أيضًا لتلبية الحاجات الأساسية الأخرى، مثل الطعام والماء.

الفصل العاشر مدينة شمسية على تلّة

يُعقد مؤتمري المفضّل في شهر فبراير من كلّ عام في منطقة ناشيونال هاربور بولاية ماريلاند، في مركز مؤتمرات رائع فيه ردهة زجاجية واسعة من تسعة عشر طابقًا تطلّ على نهر بوتوماك، وتطلق العنان للتفكير في الاحتمالات الكامنة. هذه هي قمّة وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة؛ الحدث الرئيس لوكالة حكومية مستقبلية مكلّفة بإيجاد تقنيات الطاقة الأكثر ابتكارًا وتمويلها؛ حيث يعرض مئات العلماء ورجال الأعمال أبحاثهم في صفوف لا نهاية لها من الأكشاك المليئة بالملصقات والنماذج الأولية ومنصات العرض، ويُدوّن طلاب الجامعات من جميع أنحاء البلاد الملاحظات بشراهة كالأطفال في متجر للحلوى، وهم يرسمون وظائفهم المستقبلية في مجال ابتكار الطاقة.

أتذكر قمّتي الأولى بوضوح في عام 2012م. كنت يومها طالب دراسات عليا، أعمل على خلايا بيروفسكايت الكهروضوئية وأتوق إلى الخروج من صومعة التقنية الخاصّة بي لدراسة التقنيات الأخرى، من بطاريات الجيل الثاني إلى البرامج التي يمكنها إدارة الشبكة الذكية. لكن أهمّ أولوياتي كانت مقابلة الدكتور آرون ماجومدار Arun Majumdar؛ المدير المؤسّس لوكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة Energy-Advanced Research Projects Agency (E-ARPA).

كان عالمًا مشهورًا في جامعة بيركلي سابقًا، ثمّ انتقل إلى دور صانع صفقات بارع في العاصمة في عام 2009م، عندما استخدمه الرئيس باراك أوباما لإدارة الوكالة الجديدة، وسرعان ما حشد دعمًا قويًّا من الحزبين الجمهوري والديمقراطي للوكالة التي صُمِّمت على غرار ذراع الابتكار في المرحلة المبكرة بوزارة الدفاع- وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدّمة (Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)) التي ساعدت في إنشاء الإنترنت فضلًا عن العديد من النجاحات الأخرى. كانت قضايا الطاقة والمناخ -وما زالت- تثير خلافات عميقة بين الديمقراطيين والجمهوريين في ذلك الوقت، لكنّ كلا الحزبين، من السيناتور كريس كونز (ديمقراطي عن ولاية ديلاوير) إلى السيناتور لامار ألكسندر (جمهوري عن ولاية تينيسي)، أشادا بآرون ووكالته الجديدة1.

انتهى بي الأمر بمحاصرة آرون في مقهى في نهاية يوم طويل من الجلسات؛ فأمطرته بأسئلة كثيرة عن العلم والسياسة ومستقبل الطاقة، التي طرحها بشكل عرضي بينما كان يلوح بيده لأصدقائه القدامى محيّيًا ويطلق النكات. كنت محرجًا قليلًا لمضايقة الرجل المسكين الذي ربما أراد فقط احتساء شرابه والتفكير في القمّة الناجحة. على نطاق أوسع، حقّق نموذج وكالة مشاريع الأبحاث

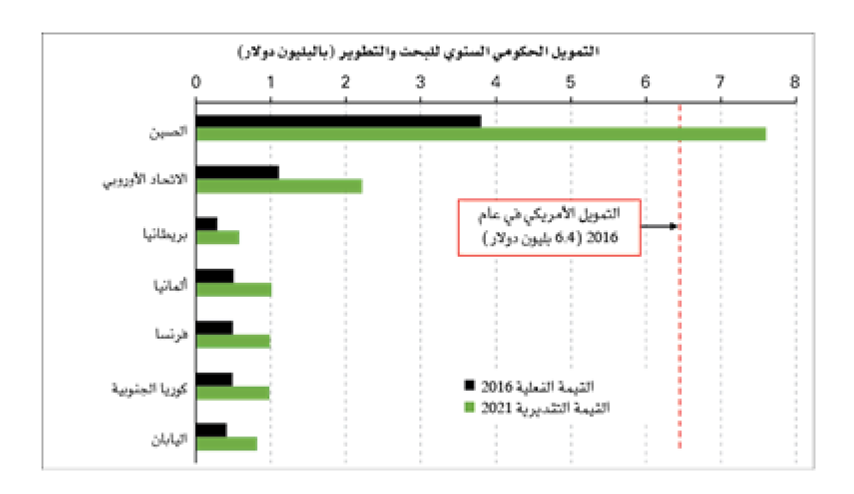
المتقدّمة للطاقة نجاحًا مبكرًا؛ فقد حفّزت المنح التي قدّمتها الوكالة عام 2016م (بعد أقلّ من عقد من تأسيسها) للباحثين الذين يطوّرون تقنيات الطاقة في المراحل المبكرة، وحقّقت بالفعل مزيدًا من الاستثمار وصل إلى ما يقرب من ملياري دولار في مشاريع القطاع الخاص.

عندما عدت في فبراير 2017م لحضور القمّة السنوية، كان الجو العام مختلفًا. كان عرض التقنية لا يزال مثيرًا للإعجاب، وكان المتحدّثون يقدّمون رؤىً متفائلة للشوارع المليئة بالمركبات الكهربائية المستقلة أو شبكة يديرها ذكاء اصطناعي متطوّر. لكن دونالد ترامب صار الآن رئيسًا، وكان السؤال الكبير الذي لم تتمّ الإجابة عنه حول ما إذا كانت إدارته ستستمر في إعطاء الأولوية لابتكار الطاقة.

ظهرت الإجابة بعد شهر: "لا" مؤكّدة؛ فقد رُفع مشروع ميزانية إدارة ترامب إلى الكونجرس وكان من بنوده خفض تمويل البحث والتطوير في الطاقة المتجدّدة بنسبة 70 بالمئة. كما هدف المشروع أيضًا إلى نزع أحشاء البحث والتطوير المتعلقين بشبكة الكهرباء والطاقة النووية. كان أحد المقترحات على وجه الخصوص مقلقًا بشكل خاص: إلغاء تمويل وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة تمامًا؛ وكان تبرير الرئيس هو أنّ " القطاع الخاص في وضع أفضل لتمويل عمليات البحث والتطوير في مجال الطاقة وتسويق التقنيات المبتكرة"2.

كان هذا إهانة للرأسمالية، فتاريخ أمريكا في الدعم المتقطّع للابتكار في مجال الطاقة أظهر عكس هذا التبرير تمامًا؛ فكلّما تضاءل الدعم العام للابتكار في مجال الطاقة، تضاءل أيضًا استثمار القطاع الخاص، ما أدى على الفور إلى إعاقة التقدّم في تطوير التقنيات الجديدة وتسويقها. من حسن الطالع، تمّ انتقاد اقتراح الرئيس بشدة من قبل المشرّعين في حزبه، حيث ذكرت لجنة فرعية في مجلس الشيوخ يرأسها السيناتور ألكسندر أنها "ترفض -بالتأكيد- هذا الاقتراح قصير النظر" لإلغاء تمويل وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة3.

من المعروف أن السياسيين الأمريكيين مغرمون بتسمية الولايات المتحدة بأنها "مدينة مشرقة على تلة “city upon a hill"، وعندما يتعلق الأمر بالابتكار في مجال الطاقة، فإنّ أمريكا كانت تاريخيًا ترقى إلى مستوى هذا التعبير. عندما كنت أكتب هذا في عام 2017، كانت الولايات المتحدة لا تزال تنفق أكثر من أي دولة أخرى على البحث والتطوير في مجال الطاقة. وكان باحثوها يقودون نظراءهم العالميين في الحصول على براءات لاختراعات الطاقة، وكانت شركاتها -مثل جنرال إلكتريك- تواصل تقليدها الفخور بالاستثمار في التقنيات الجديدة. لكن هذه الأسبقية ليست مضمونة؛ فمنذ ما يقرب من عقدين من الزمن، ظلّ الاستثمار الفيدرالي في البحث والتطوير في جميع المجالات ثابتًا، بعد نصف قرن من النمو السريع. وتشير التوقّعات إلى أنّه في حالة ركود التمويل العام للابتكار في مجال الطاقة على وجه الخصوص في السنوات القادمة، فإن الصين ستتجاوز الولايات المتحدة (الشكل 10.1).



الشكل (10.1): التمويل الحكومي التاريخي والمتوقّع لابتكار الطاقة في أفضل البلدان. تعرض الأشرطة السوداء التمويل العام الحالي للبحث والتطوير وعرض تقنيات الطاقة. تتوافق الأشرطة الرمادية مع التزامات البلدان بموجب بعثة الابتكار لمضاعفة مستويات تمويلها.
المصدر: Mission Innovation.

مما لا شك فيه أن تراجع التمويل الأمريكي سيكون كارثيًّا على مستويات عدّة. أولًا، يمكن أن يمنع الابتكار التقني الذي تحتاجه الطاقة الشمسية لتحقيق إمكاناتها. وحتى إذا عزّزت الصين ودول أخرى تمويلها للبحث والتطوير في مجال الطاقة، فإنّ الولايات المتحدة لديها حتى الآن مؤسّسات الابتكار الأكثر تطوّرًا ومن الدرجة الأولى؛ لذلك ستتباطأ الوتيرة العالمية للابتكار في مجال الطاقة من دون قيادة الولايات المتحدة. وقد تضعف بعد ذلك التقنيات المتقدّمة مثل ألواح البيروفسكايت الكهروضوئية، ومولدات الوقود الشمسي، ومحطات الطاقة الشمسية المركزة ذات درجة الحرارة العالية التي لا تزال في مرحلة التصميم، ما يجعلها غير قابلة للتسويق. وبالمثل، فإنّ مجموعة تقنيات التمكين لنظام مرن يستطيع استيعاب ناتج الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتقلبة، من بطاريات التدفّق إلى المفاعلات النووية المتقدّمة، قد تتقدم أيضًا ببطء أكبر. وإذا ما اقتصرت على الطاقة الشمسية الكهروضوئية الموجودة بالسيليكون وسبيكة داعمة متواضعة، فمن المرجّح أن تقصر الطاقة الشمسية عن توفير ثلث الطلب العالمي على الطاقة بحلول منتصف القرن أو غالبية حاجات الطاقة البشرية بحلول نهاية القرن.

أضف إلى ذلك أنّ من شأن إلغاء تمويل ابتكارات الطاقة أن يضرّ بشكل مباشر بالازدهار الاقتصادي والقدرة التنافسية للولايات المتحدة؛ وذلك لأنه حتى لو لم تحقّق الطاقة الشمسية إمكاناتها الكاملة، فإنّ الطاقة الشمسية الكهروضوئية لا تزال في طريقها للنمو بشكل كبير، وستفشل الولايات المتحدة في الحصول على جزء كبير من هذه الفطيرة المتنامية في حال لم تستثمر في الابتكار. وفي هذا السياق، تتوقّع شركة بلومبيرغ لتمويل الطاقة الجديدة Bloomberg New Energy Finance أنه حتى مع عدم وجود تحوّل تقني كبير بعيدًا عن الطاقة الشمسية الكهروضوئية

السيليكونية، فستُضاف الطاقة الشمسية بمقدار خمس عشرة مرة أكثر من الكمّية المثبّتة حتى عام 2016م على مستوى العالم حتى عام 2040م4 . وعلى نطاق أوسع، تبلغ قيمة سوق الطاقة النظيفة العالمية اليوم 300 مليار دولار، ومن المقرر لها كذلك أن تنمو بسرعة. لقد تقدّمت الصين إلى الأمام نحو الريادة الهائلة، ليس فقط بالسيطرة على إنتاج الألواح الشمسية، ولكن أيضًا بالريادة في تصنيع البطاريات وتوربينات الرياح. وستنمو هيمنتها في حال إذا لم يتمّ التصدي لها من خلال المنتجات المبتكرة من الولايات المتحدة. ولن يشكّل ذلك فرصة اقتصادية ضائعة فحسب، بل قد تعتمد الولايات المتحدة على واردات منتجات الطاقة النظيفة الصينية بشكل غير مناسب، مثل اعتمادها على النفط الأجنبي في العقود الماضية.

قد يجادل المشككون في الحاجة إلى القيادة الأمريكية، بأنّ الولايات المتحدة قد خسرت بالفعل السباق في مجال تصنيع منتجات الطاقة النظيفة مثل الألواح الشمسية، التي يتكيّف اقتصاد الصين بشكل أفضل من الناحية الهيكلية لإنتاجها. وعلاوة على ذلك، تُعدّ الألواح الشمسية سلعًا ذات هامش ربح منخفض، وهو أمر لا تريد الولايات المتحدة الخوض فيه. هذه الإدعاءات صحيحة بالتأكيد، ولا ينبغي للولايات المتحدة أن تنافس في تصنيع السلع، وعلى الاقتصاد الأمريكي بدلًا من ذلك التألق في اختراع تقنيات جديدة، وأن يطبّق تقنيات التصنيع المتقدّمة، ويحسّن باستمرار أداء منتجاته بشكل أسرع مما يمكن للمنافسة مواكبة ذلك. قد لا تشكّل صناعة الطاقة الشمسية اليوم (التي تعتمد بوضعها الحالي على الألواح الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون) نقاط القوة الأمريكية، ولكن الولايات المتحدة تتمتع بالقدرة على إعادة تشكيل الصناعة لتسخير كفاءاتها الأساسية بشكل أفضل، وذلك من خلال الاستثمار في الابتكار التقني.

للقيام بذلك، يجب أن تكون الأولوية الأولى لصانعي السياسات في الولايات المتحدة هي زيادة تمويل البحث والتطوير لتقنيات الجيل الثاني من الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى مجموعة من التقنيات الأخرى التي ستكون مطلوبة لدعم نظام الطاقة الذي يعمل بالطاقة الشمسية. لكنّ الدولارات الفيدرالية وحدها غير كافية؛ إذ يجب على القطاع الخاص في نهاية المطاف توفير الجزء الأكبر من الاستثمار لجلب التقنيات الواعدة إلى السوق. ويتعين على الحكومة الفيدرالية التكيّف مع هذا الواقع إلى حين تحديث الطريقة التي تقدّم بها الدعم للابتكار، مع الحرص على القيام بذلك بطريقة تجذب أيضًا استثمارات القطاع الخاص. وتُعدّ وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة بداية جيدة؛ لذا يجب توسيعها وليس القضاء عليها. وستحتاج الحكومة بالإضافة إلى ذلك إلى سدّ فجوة التمويل الهائلة؛ لإظهار مشاريع الطاقة الأولى من نوعها على نطاق تجاري، حتى يعرف القطاع الخاص متى تكون التقنية جاهزة في وقت الذروة.

يقدم الابتكار التقني فرصة مغرية للولايات المتحدة لتطوير تقنيات شمسية جديدة واستخدامها في جميع أنحاء العالم، وبإمكان الإدارة الأمريكية بالإضافة إلى ذلك أن تكون قدوة في كيفية تعزيز الأشكال الأخرى للابتكار التي تحتاجها الطاقة الشمسية لتحقيق إمكاناتها. على سبيل المثال، يمكن

أن يؤدّي تعديل قانون الضرائب الأمريكي إلى تسريع الابتكار المالي، وفتح صنابير تدفّق رأس المال لنشر المزيد من الطاقة الشمسية. ولتعزيز الابتكار المنهجي، يمكن للحكومات الفيدرالية وحكومات الولايات العمل معًا على تحسين قدرة شبكة الطاقة لاستيعاب اختراق عالٍ للطاقة الشمسية بمرونة. مثلًا، من خلال بناء خطوط نقل لمسافات طويلة، وتحديث الأسواق، وتشجيع مجموعة متنوّعة لمزيج طاقة خالٍ من انبعاثات الكربون، حيث تحظى هذه المقترحات بقبول أقلّ من غيرها، مثل تحديد سعر لانبعاثات الكربون لخلق مجال متكافئ بين مصادر الطاقة النظيفة والقذرة. لكنّ سعر الكربون ليس الدواء الشافي؛ فهو مجرد سياسة معقولة ينبغي أن يواكبها الآخرون الذين يعملون على دفع عجلة الابتكار.

لسوء الطالع، غالبًا ما تفشل سياسات الطاقة الشمسية اليوم في تعزيز أيّ من أنواع الابتكار الثلاثة؛ فالإعفاءات الضريبية الفيدرالية المكلفة وتفويضات الطاقة المتجدّدة الحكومية تشجّع على المزيد من نشر تقنية الطاقة الشمسية الكهروضوئية الحالية، ولكن من دون الاستعداد لمستقبل تصل فيه قيمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية إلى أقلّ من سعر التكلفة. ومن الممكن أن تثبط هذه الإعفاءات تسويق تقنيات الطاقة الشمسية الناشئة؛ فسياسات اليوم هي في أحسن الأحوال جهد مكلف لتقليص انبعاثات الكربون في الولايات المتحدة، وخلق فرص عمل مرتبطة بتركيب مشاريع الطاقة الشمسية. وبإمكان الولايات المتّحدة بدلًا من ذلك جني المكاسب الاقتصادية لصناعة الطاقة الشمسية المتقدّمة، والعمل بوصفها "مدينة شمسية فوق تلة" من خلال الاستثمار في الأنواع الثلاثة من الابتكارات اللازمة لمواصلة صعود الطاقة الشمسية؛ لتكون مثالًا تحتذي به بقية دول العالم في سبيل استبدال الوقود الأحفوري إلى حدّ كبير بالطاقة الشمسية.

ومع ذلك، سيتطلب الأمر أكثر من مجرد سياسات محلية لتمكين الطاقة الشمسية من الوصول إلى إمكاناتها العالمية. وقد يتطلب تسويق مجموعة من تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة على وجه الخصوص تمويلًا عامًّا من الدول في جميع أنحاء العالم؛ من أجل إحداث تحوّل جديد في مجال صناعة الطاقة الشمسية الراغبة في الاستثمار في الابتكار. وتستطيع القيادة الأمريكية تحقيق ذلك من خلال بعثة الابتكار Mission Innovation، وهي مبادرة عالمية للنهوض بالابتكار في مجال الطاقة. لذلك، يتعيّن على الولايات المتحدة حثّ الدول الأخرى على الاستثمار بشكل أكبر في البحث والتطوير، ومساعدتها في إنشاء مؤسّساتها الخاصّة مثل وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة (قبل تقديم التوصيات في الخارج، يجب على الولايات المتحدة الاستثمار في الابتكار في الداخل، وما كان على الرئيس ترامب أن يتعهد بالانسحاب من اتفاقية باريس بشأن تغيّر المناخ في عام 2020م، وهي خطوة دمرت مصداقية الولايات المتحدة مع الشركاء الدوليين). ويتعيّن على الولايات المتحدة أيضًا تقليل المعوّقات التجارية، والسعي بدلًا من ذلك لتعزيز صناعة الطاقة الشمسية العالمية. قد يبدو أنّ هذه الخطوات تحفّز المنافسة، ولكن هذه المنافسة تعزّز من قوّة الولايات المتحدة في الواقع؛ ففي الصناعات الأخرى التي يقودها الابتكار، مثل تصنيع أشباه

الموصلات، تسيطر الشركات الأمريكية على سلاسل الإمداد العالمية، وتستثمر بحرّية في الجيل التقني الثاني.

إن الولايات المتحدة قادرة تمامًا على تحويل الطاقة الشمسية- من كيفية تمويلها، إلى كيف تبدو عليه،

وإلى مدى مرونة النظام الذي يتم توصيلها به- والاستمتاع بفوائد القيام بذلك. ويجب على الإدارات الأمريكية إعادة التفكير في أولوياتها؛ لأن ابتكار الطاقة لا يزال هدفًا منطقيًّا، ويتّفق عليه كلا الحزبين اليوم كما كان عندما أشاد الطرفان بقرار إنشاء وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة.

الثالثة ثابتة؟

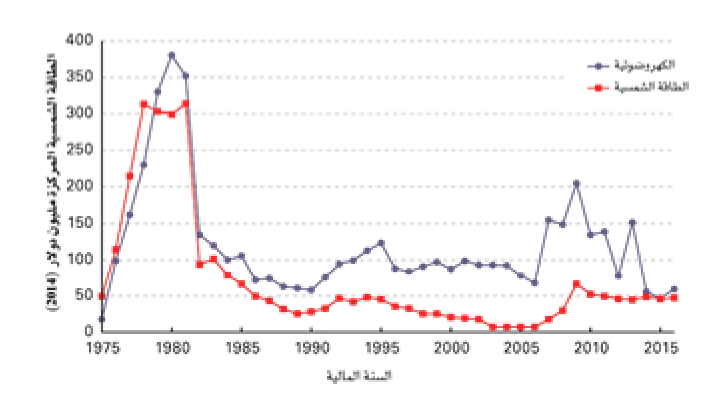
إنّ التأكيد الوارد في بيان ميزانية الرئيس ترامب على أنّ القطاع الخاص قادر على تمويل البحث والتطوير في مجال الطاقة وتسويق التقنيات ليس جديدًا؛ إذ تمتدّ جذور هذه المشاعر إلى أكثر من نصف قرن؛ أي إلى السنوات الأخيرة من الحرب العالمية الثانية. في أواخر عام 1944م، كتب الرئيس فرانكلين ديلانو روزفلت رسالة إلى فانيفار بوش Vannevar Bush الذي كان يدير مكتب البحث العلمي والتطوير في زمن الحرب، وهو المكتب الذي حسّن نظام الرادار، وأنتج المضادات الحيوية بكمّيات كبيرة، وأطلق مشروع مانهاتن لصنع أول قنبلة نووية. وتساءل الرئيس روزفلت في الخطاب عمّا إذا كان الابتكار العلمي الذي منح الحلفاء ميزة، ومن شأنه أن يكسبهم الحرب في نهاية المطاف، "يمكن استخدامه أيضًا في أيام السلام المقبلة لتحسين الصحّة الوطنية، وإنشاء المؤسسات التي تجلب وظائف جديدة، وتحسّن مستوى المعيشة الوطني"5.

"بالتأكيد"، أجاب بوش. وفي تقرير بعنوان العلم: الحدود اللانهائية Science: The Endless Frontier، قال بوش إن على الحكومة أن تموّل "البحث في أنقى مجالات العلوم"، الذي من شأنه أن يولد "تيارًا من المعرفة العلمية الجديدة لتحويل عجلة المشاريع الخاصّة والعامة". ونبّه، مع ذلك، من أنّ الدعم الفيدرالي يجب أن يأتي مع "استقلالية تامة وحرية لطبيعة البحث ونطاقه ومنهجيّته."6 ولكونه عالِمًا ومخترعًا غزير الإنتاج، كان بوش بلا شك يهدف إلى تأمين تدفّق تمويل جيد لزملائه العلماء؛ وقد جاء التمويل من دون قيود، حتى يتمكنوا من متابعة بحث مثير للاهتمام بحرية. وقد نجح في مسعاه إلى حد كبير، فمن عام 1953م إلى عام 2012م، ازداد التمويل الفيدرالي للبحوث العلمية الأساسية من 265 مليون دولار إلى 38 مليار دولار. (على الرغم من عدم وجود فرق متفق عليه بين الإثنين، فإنّ القاعدة العامة هي أنّ البحث الأساسي يهدف إلى سدّ الثغرات في المعارف العلمية، بينما يهدف البحث التطبيقي إلى حلّ المشكلات العملية في العالم الحقيقي).

لكنّ نموذج الابتكار الذي اقترحه بوش كان معيبًا بشكل خطير؛ فخلال أكثر من سبعين عامًا منذ نشر تقريره التاريخي، صار من الواضح أنّ مجرد تمويل البحث العلمي الأساسي لا يكفي لضمان شمول التقنيات التجارية الجديدة، وخاصّة في مجال الطاقة. لكن فلسفة بوش أصبحت في رحلتها الطويلة جزءًا من شريعة المحافظين، فقد دمج الرئيس رونالد ريغان ومستشاروه دعم بوش للبحوث الأساسية مع مبادئ السوق الحرة الخاصّة بهم، واستنتجوا أنّ الدعم الفيدرالي للبحث التطبيقي والتطوير سوف يغزو مجال القطاع الخاص. وسعت إدارة ترامب (التي ركزّت على تقليص ما اعتبرته حكومة منتفخة) لتوظيف نفور ريغان من تطبيق البحث والتطوير من أجل وأد أيّ برنامج حكومي يعمل على تطوير التقنية بنية التطبيق العملي.

ومع ذلك، فإنّ الأدلة المتاحة لا تثبت الفرضية القائلة بأنّ الدعم الحكومي للبحث التطبيقي والتطوير يقلص الاستثمار الخاص. وفي الواقع تشير موجتان قصيرتان من الاستثمار في مجال البحث والتطوير في مجال الطاقة التطبيقية خلال نصف القرن الماضي إلى الاستنتاج المعاكس تمامًا. وقد أظهرت الموجة الأولى، التي بدأتها الحكومة الفيدرالية وأوقفتها بشكل مفاجئ، أنّ التمويل الفيدرالي الذي لا يمكن توقعه للبحث التطبيقي والتطوير يمكن أن يجمّد أجواء الاستثمار الخاص في ابتكار الطاقة. والثانية، كانت بقيادة مستثمرين من القطاع الخاص الذين نفدت أموالهم، الذين برهنوا على أنّ التقنيات الناشئة تواجه فجوة في التمويل لا يرغب القطاع الخاص في سدّها أو لا يستطيع سدّها. ومع ذلك، فإنّ تعلم الدروس من هاتين الموجتين الفاشلتين من الاستثمار في الابتكار يمكن أن يثري إستراتيجية سياسية لتحفيز موجة ثالثة مستدامة.

جاءت الموجة الأولى في السبعينيات من القرن الماضي استجابة لأزمة النفط، فقد عزّزت الولايات المتحدة بشدة في عهد الرئيس جيمي كارتر تمويل البحث والتطوير في كلّ من الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة (الشكل 10.2).وركزت هذه الأموال على الأنشطة التطبيقية لتحسين تقنية الطاقة الشمسية، وامتدت الجهود لتعزيز الكفاءات في المختبر وإظهار تقنيات الطاقة الشمسية على نطاق واسع. ولكن، هذا الدعم الفيدرالي انهار بسرعة أكبر من السرعة التي ارتفع بها. بعدما نجا الرئيس ريغان من أزمة طاقة بسبب انهيار أسعار النفط في الثمانينيات، أخذ يتصرف بحرية مطلقة في تقليص أنشطة البحث والتطوير التطبيقية التي لا تتوافق مع رؤيته الخاصّة بالحكومة المصغرة والأسواق الحرة.



الشكل (10.2): تاريخ تمويل وزارة الطاقة الأمريكية للبحث التطبيقي والتطوير في تقنيات الطاقة الشمسية. تم تسجيل مستويات التمويل للبحث التطبيقي والتطوير الذي ترعاه وزارة الطاقة في الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة. لاحظ أنّ وزارة الطاقة تموّل أيضًا أبحاث العلوم الأساسية ذات الصلة بتقنيات الطاقة الشمسية؛ والوكالات الفيدرالية الأمريكية الأخرى، مثل مؤسسة العلوم الوطنية التي تقوم أيضًا بتمويل البحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية.ومع ذلك فإنّ تمويل وزارة الطاقة يمثّل الجزء الأكبر من التمويل المخصّص لتطوير تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة.

المصدر: Schmalensee et al. (2015).

أعاقت هذه الخطوة الابتكار في مجال الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة، وقطعت الطريق أمام المشاريع البحثية الممولة فدراليًّا في منتصف الطريق، وأوقفت البرنامج التجريبي الذي تبلغ تكلفته ملياري دولار قبل أن يظهر الإمكانات التجارية لتقنيات الطاقة الشمسية بالكامل.8 وبدلًا من خلق مساحة للقطاع الخاص لتولي المسؤولية والاستثمار في الابتكار، أدّى ذلك إلى انخفاض بنسبة 50 بالمئة في الاستثمار الخاص في البحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية من عام 1985م إلى عام 1995م، عندما ظلّ التمويل الفيدرالي للبحث التطبيقي والتطوير منخفضًا9.

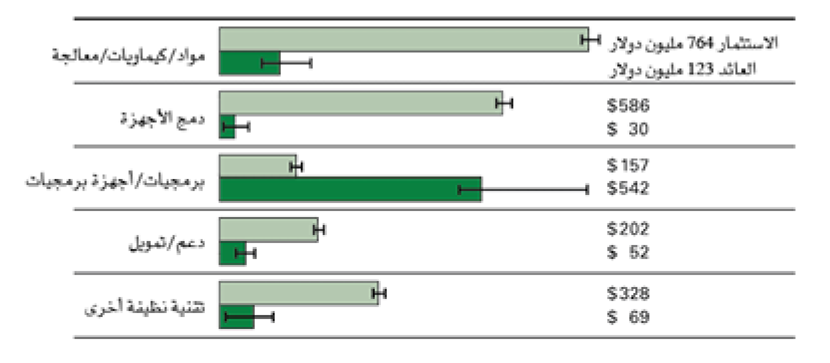
إن الدروس البارزة هنا هي: أولًا، أنّ التمويل الحكومي الذي يصعب توقعه للبحث والتطوير التطبيقي يمكن أن يهدئ مناخ الاستثمار في القطاع الخاص؛ وثانيًا، يمكن أن تؤدّي مستويات التمويل المنخفضة المستمرة إلى إبعاد القطاع الخاص بدلًا من توفير مساحة له للاستثمار في الابتكار. والجدير بالملاحظة أنّ ريغان قد تجنّب -إلى حدّ كبير- البحث العلمي الأساسي، واستخدمت ميزانيته بوصفها نموذجًا لعشرات السنين، فكانت العلوم الأساسية تشكل 60 بالمئة من جميع أنشطة البحث والتطوير في مجال الطاقة في أواخر التسعينيات.

في الموجة الثانية من الاستثمار في ابتكار الطاقة الشمسية، التي كانت مدفوعة من القطاع الخاص، استثمر أصحاب رؤوس الأموال في وادي السيليكون 25 مليار دولار في الشركات الناشئة (العديد منها شركات الطاقة الشمسية)، من عام 2006م إلى عام 2011م، ولكنّهم خسروا أكثر من نصف أموالهم. لقد فشلت الشركات الناشئة المدعومة -إلى حدّ كبير- بسبب التوقيت الرهيب للطفرة الصينية في إنتاج الألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون، التي أنتجت فيضانًا من الإمدادات

الرخيصة التي قضت على التقنيات الناشئة قبل أن تصل إلى النطاق التجاري. وتتحمل الشركات الناشئة نفسها جزءًا من هذا الفشل، فقد اتخذ كثير منها قرارات تجارية سيئة سابقة لأوانها (على سبيل المثال، توسيع نطاق إنتاج المنتجات التي لم تكن جاهزة بعد لوقت الذروة التجاري).

كما نجم انهيار الشركات الناشئة -إلى حد كبير- عن عدم كفاية دعم القطاع الخاص. لقد بحثت أنا وزميلي بن جادي في المئات من الشركات الناشئة في مجال تقنية الطاقة النظيفة التي تلقت تمويلًا من عام 2006م إلى عام 2011م. وخلصنا إلى أنّ نموذج رأس المال الاستثماري كان مناسبًا بشكل خاص لشركات الطاقة الشمسية؛ إذ يُعدّ رأس المال الاستثماري أمرًا رائعًا لإطلاق شركات البرمجيات؛ لأنها تحتاج إلى رأس مال محدود، ويمكنها إعادة مبالغ مذهلة إلى مستثمريها إذا نجحت. ويمكن أن ينجح النموذج أيضًا مع شركات ناشئة في مجال التقنية الطبّية ذات رأس مال ضخم؛ لأن الشركات الكبيرة (مثل شركات الأدوية) غالبًا ما تكون على استعداد للاستثمار المشترك أو الاستحواذ على شركات ناشئة.

ولكن عندما تعلق الأمر بتطوير الشركات الناشئة لموادّ شمسية جديدة، أو كيميائية للبطاريات، أو تركيبات وقود حيوي، فقد وجد أصحاب رؤوس الأموال أنفسهم وحدهم، وكانت شركات النفط الكبرى تخرج من مجال الطاقة الشمسية بدلًا من دخولها. وبفضل التمويل التحفيزي لمرة واحدة، بلغ التمويل الحكومي للبحث والتطوير ذروته في عام 2009م، لكنّه انخفض بعد ذلك (الشكل 10.2). وعندما تُركوا لوحدهم لتمويل شركات الطاقة الشمسية بمتطلبات رأسمالية بمئات الملايين من الدولارات لإنشاء مرافق إنتاج وبجداول زمنية للتسويق قد تمتد لعقد أو أكثر، فكثيرًا ما أصرّ المستثمرون المغامرون على أن تتسابق الشركات على التوسع. ولكنّهم سرعان ما تخلوا عن أسهمهم بمجرد نفاد أموال الشركات. وجاء الجزء الأكبر من خسائرهم في تقنيات الطاقة النظيفة من الشركات الناشئة التي كانت تطوّر مواد وتركيبات كيميائية وعمليات جديدة. وعلى النقيض من ذلك، فإنّ استثماراتهم في برامج الطاقة النظيفة كانت مربحة إلى درجة كبيرة.



الشكل (10.3): استثمارات وعوائد رأس المال الاستثماري من قبل القطاع الفرعي لتقنية الطاقة النظيفة. حُسِبت هذه الأرقام من قاعدة بيانات لجميع الشركات الناشئة المعروفة في مجال تقنية الطاقة النظيفة التي تتلقى استثماراتها الكبيرة الأولى ("الجولة- أ") من شركات رأس المال الاستثماري بين عامي 2006م و2011م. لكلّ قطاع فرعي، تقارن الأعمدة إجمالي استثمار (الجولة-أ) في الشركات الناشئة في هذا القطاع مع العوائد التي

حقّقها هؤلاء المستثمرون من الجولة-أ عندما تمّ الاستحواذ على أيّ من هذه الشركات أو طرحها للاكتتاب العام في سوق الأوراق المالية. يحتوي كلّ شريط على هامش خطأ مرتبط به ينشأ من الفجوات في البيانات المتاحة للجمهور.
المصدر: Gaddy, Sivaram, Jones, and Wayman (2017).

قد يقول بعضهم إنّ هذه الحلقة أثبتت أنّ الحكومة الفيدرالية ليس لها علاقة بالتدخّل في تطوير التقنية التطبيقية. على أي حال، لقد خسرت الحكومة الأمريكية نصف مليار دولار في ضمان قرض سيئ السمعة لشركة سوليندرا. لكن برنامج القرض الفيدرالي الشامل لمشاريع الطاقة كان رابحًا وليس خاسرًا (لقد حقّق أيضًا نجاحات ملحوظة، مثل تمويل تسلا)11.

ربما تكون الحكومة الفيدرالية مخطئة في هذا الصدد؛ لأنها في الواقع لم تجازف بما يكفي، ناهيك عن المخاطرة الكبيرة. وبصرف النظر عن بعض الاستثمارات المحفوفة بالمخاطر، فقد ركّز برنامج القرض على تمويل تجارب واسعة النطاق للتقنيات المفهومة جيدًا، مثل مزارع الطاقة الشمسية الكهروضوئية. ربما كان من الأفضل إنفاق تلك الأموال بتمويل أقلّ من نصف مليار دولار، وعلى دعم التقنيات الناشئة على نطاق معتدل لإثارة اهتمام المستثمرين من القطاع الخاص. ونظرًا إلى أنّ أصحاب رؤوس الأموال المغامرين كانوا غير قادرين أو غير راغبين في دفع فاتورة مثل هذه التجارب التقنية، فقد تلاشت الشركات الناشئة الواعدة في مجال الطاقة فيما يسمّى وادي الموت Valley of Death، لعدم قدرتها على الوصول إلى النطاق المطلوب لجذب المزيد من المستثمرين المحافظين والأثرياء.

الدرس المستفاد من هذه المناقشة هو إيضاح أنّ ليس كلّ التمويل الحكومي للبحث التطبيقي والتطوير والعرض العملي فعّال وذو جدوى. بل على العكس، فمن الواضح، بعد فوات الأوان، أنّ برنامج قروض وزارة الطاقة كان يجب أن يستهدف تثبيت تقنيات المرحلة المبكرة، وأن توزّع أمواله بين المزيد من المشاريع. لقد أنتجت الطفرة في تمويل البحث والتطوير في مجال الطاقة في السبعينيات من القرن الماضي مشاريع هدر غير عملية مثل برنامج الوقود الاصطناعي Synfuels الذي بلغت تكلفته 4.5 مليار دولار، والذي فشل في إنتاج أي بديل للنفط (على الرغم من أنّ الباحثين لورا أنادون Laura Anadon وجريج نيميت Greg Nemet يجادلان في دراسة استعادية حديثة بأنّ البرنامج أنتج تقنيات قيّمة لتطبيقات الطاقة الأخرى)12.

من المهم، بكل تأكيد، تحسين المحاولات السابقة من أجل تصميم مخططات حكومية أكثر فاعلية لدعم البحث التطبيقي والتطوير وتثبيت التقنية، ولكن من دون أيّ دعم حكومي على الإطلاق لا توجد إلا فرصة ضئيلة لينقل القطاع الخاص وحده تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة خارج وادي الموت.

إذا ما تأملنا وضع الطاقة، فإنّ الفرضية القائلة بأنّ تمويل العلوم الأساسية فقط (من دون تطبيق مقصود) يُعدّ أفضل طريقة لدعم الابتكار هي فرضية بعيدة عن الواقع في العديد من المجالات. وفي الواقع، كانت وزارة الدفاع الأمريكية في فترة ما بعد الحرب هي الداعم الأكثر إنتاجًا للابتكار، والتي تراهن على التقنيات التي تضع في الحسبان أهدافًا واضحة للأمن القومي. إنّ النهج العسكري الموجه نحو الهدف في تمويل الرهانات التقنية في المرحلة المبكرة (من خلال وكالة مشاريع البحوث الدفاعية المتقدمة) والاستمرار في دعم تطوير تلك التي تبشّر بالخير، قد أدّى إلى العديد من النجاحات، بما في ذلك نشر الصواريخ الدقيقة ومقاتلات الشبح والطائرات من دون طيار.13 لقد عانت بعض الجهود من تجاوز التكلفة والجدول الزمني، لا سيما التطوير المستمر لمقاتلات الهجوم المشترك، لكن الجيش لا يزال بإمكانه التباهي بأنه أثّر بصورة رئيسة في تمكين التفوق التقني الحالي للولايات المتحدة.

في بعض الأحيان، انتهى الأمر بالاستثمارات العسكرية المستهدفة إلى تطبيق أوسع حسب ما كان متوقعًا، وهذه ميزة جانبية تستحق الإشادة. على سبيل المثال، كان الجيش هو المشتري الوحيد للدوائر المتكاملة في الخمسينيات من القرن العشرين. لقد خطط لاستخدامها في أنظمة توجيه الصواريخ، ولكن انتهى بها الأمر إلى إنتاج صناعة أشباه الموصلات التي صارت رقائقها الآن في جهاز الأيفون الخاص بك.14 وبالمثل، كان الهدف العسكري في إنشاء أربانت ARPANET، وهو شبكة بدائية قبل الإنترنت الذي نعرفه الآن، تسهيل مشاركة النتائج من أجهزة الحاسوب البحثية القليلة المنتشرة في جميع أنحاء البلاد. ومن الواضح أنّ هذه المهمّة توسّعت الآن لتشمل مشاركة كل شيء حتى مواء القطط.

تُعدّ نجاحات وزارة الدفاع حجة قوية تصبّ في أهمية تضمين البحث التطبيقي والتطوير جنبًا إلى جنب مع العلوم الأساسية في محفظة دعم الحكومة للابتكار. في الواقع يجادل فينكي نارايانامورتي Venky Narayanamurti؛ العميد السابق لكلية الهندسة في جامعة هارفارد، في كتابه لعام 2016م بأن التمييز بين البحث والتطوير الأساسي والتطبيقي هو أمر مستحدث.15 لقد كان نموذج فانيفار بوش في عام 1945م مقنعًا إلى حدّ ما. كان يرى أنّ الدعم العام للعلوم الأساسية من شأنه أن يؤدّي إلى خلق فرص للتمويل الخاص من أجل تطوير التقنية. إلا أنّ العديد من الأمثلة على المسار المعاكس غير الخطي ظهرت منذ ذلك الحين لمواصلة الفصل بين البحث والتطوير الأساسي والتطبيقي. يلقي كتاب فينكي نظرة على مختبرات بيل Bell Labs، وهي بؤرة للابتكار في فترة ما بعد الحرب. ويستنتج الكاتب بأنّ تلاقح الأفكار المتبادل بين الباحثين الذين يفكرون في مشكلات "العلوم البحتة" النظرية مع أولئك الذين يحوّلون هذه الأفكار إلى منتجات حقيقية، مثل الترانزستورات، هي الطريقة الأكثر فاعلية لتطوير التقنيات التي تعمل على تحسين المجتمع. وبالمثل، فإن أفضل المعامل البحثية اليوم، مثل معهد هوارد هيوز الطبّي Howard Hughes Medical Institute، تتجاهل التمييز بين البحث والتطوير الأساسي والتطبيقي.

السؤال الصحيح الذي يجب طرحه إذن ليس ما إذا كان ينبغي على الحكومة الفيدرالية دعم الابتكار التطبيقي؛ فالحجة للقيام بذلك قد تؤخذ أو ترد، ولكنّ الأهم من ذلك بكثير هو معرفة كيفية القيام بذلك بشكل أكثر فاعلية في القرن الحادي والعشرين.

كيفية تمويل ابتكارات الطاقة

عملت في عام 2016م ضمن فريق لجنة تحكيم لتقييم باحثي ما بعد الدكتوراه الذين تقدّموا بطلبات للحصول على منح من برنامج "صنشوت SunShot" التابع لوزارة التعليم. كانت الأهداف هي اختيار الباحثين الديناميكيين والموهوبين الذين كانوا يدرسون تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المبتكرة، مثل البيروفسكايت أو الخلايا ذات النقاط الكمومية quantum dot cells، وإعداد جيل جديد من القادة في هذا المجال.

ارتقى المتقدّمون إلى مستوى التحدّي؛ كان لبعض المشاريع القدرة على تحطيم سجلات الكفاءة الحالية، وركّز آخرون على الدراسات الأساسية لعمليات التصنيع القابلة للتكرار. وكان لبعض الباحثين سنوات عديدة من الخبرة، في حين أنّ آخرين كانوا حديثي التخرّج في برامج الدكتوراه، إلا أنّ أسماءهم موجودة في العديد من المقالات البحثية في مجلات مرموقة؛ ولا يسعني إلا أن أفكّر في أنّه: "يجب أن نموّل كلّ واحد من هؤلاء المتقدّمين."

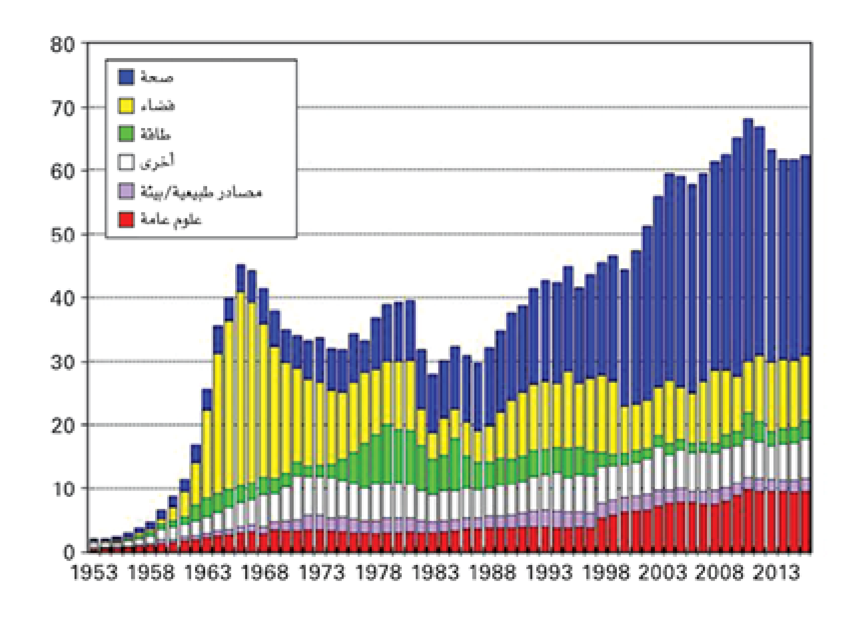
عدت للواقع عندما اجتمعت اللجنة لمقارنة المتقدّمين، وسرعان ما صار واضحًا أنّ عددًا قليلًا فقط من الباحثين يمكنهم الحصول على التمويل بالفعل نظرًا إلى قيود الميزانية الصارمة للبرنامج، وبذلك استُبعدت الأغلبية. وعلى الرغم من أنّهم قد يتلقون دعمًا من مصادر تمويل أمريكية أخرى، مثل مؤسّسة العلوم الوطنية، فإنّ هذا الدعم سيكون محدودًا أيضًا. وعلى النقيض من ذلك، كان هؤلاء بالنسبة إلى خارج الولايات المتحدة، يُعدّون أهدافًا عالية القيمة؛ حيث يمكن اقتناصها من قبل دول أخرى في أوروبا أو آسيا، والذين يسعدون بتمويل أبحاثهم المتقدّمة. إنّ السماح لهم بالذهاب إلى أماكن أخرى من شأنه أن يُعدّ -إلى حد ما- إطلاق الولايات المتحدة النار على نفسها، والعوائد الاقتصادية التي كانوا قادرين على تحقيقها ستفوق بكثير الاستثمار مقدّما في أبحاثهم.

لتسريع الابتكار في مجال الطاقة الشمسية، يجب أن تكون الأولوية الأولى للحكومة الأمريكية هي زيادة التمويل بشكل كبير للبحث التطبيقي والتطوير في تقنيات الطاقة الشمسية الخارقة؛ حيث يشير الباحثون في معهد ماساتشوستس للتقنية إلى أنّ إحدى طرق القيام بذلك هي إعادة تخصيص الأموال التي تذهب حاليًا لدعم الأنشطة الأقلّ تطوّرا، مثل البحث في تقليل التكاليف غير المباشرة لتركيبات الألواح الشمسية على الأسطح، أو صنع السيليكون الحالي لتعيش لفترة أطول قليلًا، وسيكون هذا التحوّل معقولًا. من بين ميزانية وزارة الطاقة التي تزيد على 200 مليون دولار للبحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية التطبيقية، يذهب أقلّ من النصف إلى تقنيات الطاقة الشمسية

الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة16. وعلى الرغم من أنّ بعض أنشطة البحث والتطوير التي تسعى في التحسين التدريجي للتقنية الحالية قد تملأ فجوة يعجز القطاع الخاص عن معالجتها، فإنّ الحكومة ستكون أكثر فاعلية إذا موّلت الجيل الثاني من تطوير التقنية.

مع ذلك، سيكون من الخطأ الاستمرار على المصروفات الهزيلة التي لا تذكر ضمن الميزانية الصغيرة التي تخصّصها الحكومة الفيدرالية للبحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية؛ فلو حُسِبت ميزانية الدراسات جميعها؛ بداية من البحث العلمي الأساسي في فيزياء أشباه الموصلات، وحتى التحليلات الاقتصادية لتكاليف تصنيع الطاقة الشمسية، فإنّ تكلفة البحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية يُقدّر بأقلّ من 400 مليون دولار في عام 2015م.17 وبالمقارنة، تنفق الحكومة الفيدرالية أكثر من عشرة أضعاف الإعفاءات الضريبية لصناعة النفط والغاز.

يجب أن يدرك صانعو السياسة في الولايات المتحدة أنّ تمويلها الزهيد لا يرتقي إلى أهمّية الابتكار في مجال الطاقة الشمسية؛ حيث إنّ عدم التوافق هذا في الدعم يضرّ الابتكار في مجال الطاقة. وكما يوضّح الشكل (10.4)، فإنّ التمويل الفيدرالي الأمريكي للابتكار في مجال الطاقة أقلّ بمرّات عدّة من التمويل المخصّص للبحث والتطوير في مجال الصحّة والفضاء. وقد تُرِك تمويل البحث والتطوير الدفاعي خارج الرسم البياني، وهو أكبر من تمويل جميع عمليات البحث والتطوير غير الدفاعية مجتمعة.



الشكل (10.4): الاستثمار الفيدرالي الأمريكي في البحث والتطوير غير الدفاعي، حسب المجال. يبين كلّ شريط ميزانية الحكومة الفيدرالية للبحث والتطوير غير الدفاعي، والتي تُقدَّر بمليارات الدولارات لعام 2016م.
المصدر: American Association for the Advancement of Science.

يُضاف إلى ذلك أنّ إهمال البحث والتطوير في مجال الطاقة آخذ في الازدياد؛ حيث انخفض البحث والتطوير في مجال الطاقة بين عام 1979م وحتى عام 2017م من 13 بالمئة إلى 2 بالمئة على مستوى أنشطة البحث والتطوير الفيدرالية جميعها. وبقلق بالغ إزاء "العواقب الاقتصادية والأمنية والبيئية" لقلّة الاستثمار، دعا العديد من قادة الأعمال بمن فيهم بيل جيتس Bill Gates الحكومة الفيدرالية في أبريل 2017م إلى مضاعفة التمويل لابتكار الطاقة إلى 16 مليار دولار سنويًّا18.

ومع ذلك، فإن مجرد زيادة التمويل للبحث والتطوير لا يكفي؛ إذ تحتاج الحكومة الفيدرالية أيضًا إلى استثمار تلك الدولارات بشكل أكثر ذكاءً. وللقيام بذلك يجب أن تتبنى العديد من التقنيات التي تستخدمها وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة، التي تتخذ نهجًا شديد التركيز على الهدف لتمويل تقنيات "تغيّر قواعد اللعبة" في وقت مبكر من تطويرها، نحو تطبيقها النهائي.19 على سبيل المثال، مع إدراك أن التقنيات الكهروضوئية أو تقنيات الطاقة الشمسية المركزة الحالية تسخّر جزءًا بسيطًا فقط من ضوء الشمس الوارد، فقد استثمرت وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة في مجموعة من "التقنيات الهجينة" التي تولد الطاقة والحرارة، وتستخدم تخزين الطاقة الحرارية لتخفيف تقطع التيار الكهربائي.20 ترتبط كلّ محفظة من الاستثمارات الخاصّة بوكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة بحاجة مُلِحة بدلًا من عزلها في تخصّص علمي معين. وعلى العكس من معظم تدفّقات تمويل البحث والتطوير الفيدرالية التي يصعب إيقافها، فإنّ وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة لا تعرف الرحمة بشأن قطع التمويل عن المشاريع التي من الواضح أنها تخطت مراحلها.

وعلى الرغم من أنّ عمر وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة أكثر من عقد من الزمان بقليل، فإنّ التحليلات المبكرة تشير إلى أنّ نهجها فعّال. كانت آنا غولدشتاين Anna Goldstein,؛ الباحثة في جامعة هارفارد، في قمة اللطف لمشاركة بعض نتائجها الأولية معي.21 لقد علمت منها أن الباحثين الذين تموّلهم وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة يتمكنون من الحصول على براءات الاختراع ونشرون مؤلفات بأكثر من خمس مرات في المتوسط العام، مقارنة بتلك التي تموّلها أذرع وزارة الطاقة الأخرى التي تموّل البحث والتطوير في مجال الطاقة. وعندما تموّل وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة الشركات الناشئة، فإنها تميل إلى تلقي المزيد من تمويل إضافي من القطاع الخاص أكثر من الشركات الناشئة في مجال الطاقة التي تموّلها هيئلت حكومية أخرى. آنا ليست وحدها التي تشيد بوكالة مشاريع الأبحاث المتدّدمة للطاقة؛ فقد أصدرت الأكاديمية الوطنية للعلوم في عام 2017م، تقريرًا رئيسًا يؤيد الأداء المبّكر للوكالة.22 وقد حثّت إدارة الرئيس أوباما إدراكًا منها للنجاح المبكر للنموذج، الكونجرس على زيادة ميزانية وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة من 300 مليون دولار إلى مليار دولار23.

ومع ذلك، فإنّ الحكومة الفيدرالية لا تستطيع أن تمهّد عملية تسويق تقنيات الطاقة الجديدة بمفردها. وبدلًا من ذلك يتعيّن على القطاع الخاص -في نهاية المطاف- توفير نصيب الأسد من الاستثمار؛ حيث إنّ الهدف من التمويل الحكومي هو تشجيع روّاد الأعمال من القطاع الخاص والمستثمرين

والشركات على المراهنة على التقنيات الواعدة. وبالإضافة إلى وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة التي نجحت في جذب استثمارات المتابعة الخاصّة للتقنيات التي تختارها، فقد ابتكرت إدارة أوباما عدّة مؤسسات أخرى لتشجيع التعاون بين القطاعين العام والخاص؛ وهذه تستحق أن تتوسع.

تهدف المجموعة الأولى الجديدة من المؤسسات التي تسمّى "مراكز أبحاث الطاقة الحدودية "Energy Frontier Research Centers (EFRCs)"، إلى ربط البحث العلمي الأساسي بالحاجات التقنية الملحّة. ويرتبط كثير من المراكز الستة والثلاثين الموجودة مباشرة بتحويل الطاقة الشمسية، بما في ذلك مركز فيزياء الصور الشمسية المتقدّمة في مختبر لوس ألاموس الوطني. وتوجد مراكز أبحاث الطاقة الحدودية في الجامعات أو المختبرات الوطنية، حيث تستطيع الشركات الخاصّة تقديم الدعم المالي للباحثين الأكاديميين أو التعاون معهم24.

مجموعة أخرى من المؤسسات التي تجمع الباحثين من الصناعة والأوساط الأكاديمية والمختبرات الممولة اتحاديًّا هي شبكة مراكز ابتكار الطاقة Energy Innovation Hubs .25 توجد هذه المراكز في مختبرات الولايات المتحدة الوطنية، وهي تُعدّ شبكة من سبع عشرة جوهرة تشكّل التاج الملكي للابتكار الأمريكي، وتعود جذورها إلى مشروع مانهاتن (في أثناء الحرب العالمية الثانية)، ولكنها اليوم رائدة في إجراء البحث والتطوير في مجال الطاقة. توجد حتى عام 2017م، أربعة مراكز بما في ذلك مركز الوقود من ضوء الشمس Fuels from Sunlight في مختبر لورانس بيركلي الوطني، ومركز البطاريات وتخزين الطاقة Batteries and Energy Storage في مختبر أرجون الوطني.

على الرغم من أنّ هذه المراكز يمكن أن ترسي نظامًا إيكولوجيًّا للابتكار الإقليمي، وتجمع القطاعين العام والخاص للدفع بقوّة نحو حلّ تحدّيات التقنية الرئيسة، إلا أنها تلقّت أقلّ من 100 مليون دولار في عام 2016م، وهذا أقلّ من 2 بالمئة من التمويل الفيدرالي لابتكار الطاقة. لذا سيكون من المنطقي بشكل كبير توسيع المراكز وإضافة محاور جديدة؛ فقد تعمل هذه المحاور الإضافية على تطوير التقنية الكهروضوئية والطاقة الشمسية المركزة، فضلًا عن المساعدة في تطوير شبكات طاقة مرنة لدمج مستويات عالية من الطاقة المتجدّدة المتقطعة.

لجعل الاستثمار في ابتكار الطاقة أكثر قبولًا للقطاع الخاص، على الحكومة الفيدرالية توفير مرافق مشتركة للاستخدام الخاص من أجل تقليل التكاليف الرأسمالية الباهظة والزائدة عن الحاجة لكلّ شركة تبني مرافقها الخاصّة؛ بحيث تتيح لها المختبرات الوطنية مختبراتها ومعدّاتها مقابل رسوم. وقد أطلقت مؤخرًا برامج مبتكرة، مثل طريق السيكلوترون Cyclotron Road؛ لتمويل وإسكان روّاد الأعمال الذين يمكنهم تطوير تقنياتهم باستخدام الموارد الواسعة في الحرم الجامعي.26 ويمكن لهذا الترتيب أن يملأ الفجوة التي يتركها مستثمرو رأس المال الاستثماري المتقلبون بشأن تمويل الأبحاث في مواد شمسية جديدة، مثلًا.

علاوة على ذلك، تقدّم الشبكة الوطنية لمؤسسات التصنيع المموّلة اتحاديًّا (Manufacturing USA) تسهيلات للشركات لتطوير عمليات إنتاج منتجات جديدة.27 ولذلك، قد تتشجّع الشركة، مثلًا، على الاستثمار في تطوير المرايا الجامعة للطاقة الشمسية المركّزة عالية الحرارة، إذا كان بإمكانها تجربة المعدات المتقدّمة في منشأة فيدرالية؛ لمعرفة كيفية تصنيع مثل هذا المنتج على نطاق واسع.

أخيرًا، تكمن أكبر فجوة لم يسدّها القطاع الخاص بمفرده في إظهار التقنيات الجديدة على نطاق تجاري، حيث يُعدّ تحقيق التجارب الناجحة أمرًا بالغ الأهمّية لتقليل المخاطر التي يتصوّرها مستثمرو القطاع الخاص والشركات فيما إذا كان يتعيّن عليهم تحمّل الوقت والمصاريف لجلب التقنية إلى السوق. لسوء الطالع، فإنّ مكتب برامج القروض التابع لوزارة الطاقة راهن على نجاح شركة سوليندرا سيئة السمعة، وبعد إفلاسها صارت محاصرة سياسيًّا، ومن غير المرجّح أن يكون المكتب وسيلة لتمويل هذه التجارب في المستقبل.

إن الأفكار بخصوص ما يمكن أن يحلّ محلّ هذا المكتب لا نهاية لها، فقد أوصت مجموعة قادة الأعمال بزيادة الأموال المخصّصة لابتكار الطاقة إلى 16 مليار دولار سنويًّا، وأوصت أيضًا بإنشاء شركة خاصّة تُموَّل عن طريق اعتمادات صادرة عن الكونغرس تُقدَّر بنحو 20 بليون دولار على مدى عقد من الزمان، وذلك للاستثمار في التجارب التقنية.28 ولأن هذه المؤسسة ستكون بعيدة عن الحكومة، فإنّها ستكون معزولة عن التدخّل السياسي، وسيتطلب الأمر حصصًا في الشركات والمشاريع بدلًا من مجرد التأمين على القروض؛ حتى تتمكّن الشركة بالفعل من جني الأموال من رهاناتها. ولتهدئة المخاوف من أن مثل هذه الشركة سوف تزاحم القطاع الخاص، فقد تكون هناك حاجة إلى القيام باستثماراتها جنبًا إلى جنب مع شركاء من القطاع الخاص، الأمر الذي من شأنه جذب الاستثمار الخاص بدلًا من مقاومته.

اقترح آخرون تكليف حكومات الولايات لتوجيه تمويل المشاريع التجريبية الأكثر منطقية من السياق الإقليمي، ولا يزال آخرون يقترحون استخدام الجوائز لجذب الاستثمار الخاص في المشاريع التجريبية. وقد استخدمت وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) مثل هذه الإستراتيجية بفاعلية (على سبيل المثال، حثّت شركة SpaceX التي يرأسها إيلون ماسك على تحقيق سلسلة من مؤشّرات الأداء).29 قد تعزّز جائزة الطاقة المنافسة بين الشركات ورجال الأعمال، مثلًا، عرض لتركيب مساحة كبيرة من الطلاءات الكهروضوئية المرنة وعالية الكفاءة، أو توليد كمّيّات كبيرة من الهيدروجين من مولد للوقود الشمسي. وبالنظر إلى حجم فجوة التمويل، فإنّ كلّ هذه السبل المختلفة للحكومة لدعم العروض التوضيحية التقنية تستحق المتابعة.

ومع ذلك، فإنّ الاعتراض المحتمل هو أنّ القيام بذلك من شأنه أن يتعدّى على السوق الحرة وطريقة اختيار الفائزين والخاسرين. لكنّ هذا النهج في تقديم الدعم الحكومي، ليس للعلوم الأساسية في

المختبر فحسب، ولكن أيضًا للبحوث التطبيقية وتوسيع نطاق التصنيع والعروض التوضيحية التجارية، وهذا ما فعله الجيش بالفعل، وحقّق نتائج مذهلة.

تبدأ عمليات الجيش مع قيام وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدّمة بعمل رهانات عديدة على تقنيات عالية المخاطر وغير مثبتة. بعد ذلك يموّل الجيش أكثر المشاريع الواعدة، فقد قدّم الدعم للتصنيع والتجارب على نطاق واسع لعقود؛ بدءًا من مصانع الترانزستور في الخمسينيات إلى المصفاة التي يُخطَّط لها، التي أُعلن عنها في عام 2017م لإنتاج الوقود الحيوي للبحرية الأمريكية.30 وغالبًا ما تشتري فروع الخدمة المختلفة المنتج النهائي للتقنية التي تدعمها الجيش، ما يمنح الشركات الثقة في أنّ منتجاتها ستعثر في النهاية على مشترٍ في حال كان أداؤها يوافق المتوقع منها.

ويستطيع الجيش، في الواقع، أن يكون الداعم الأكثر فاعلية لابتكار الطاقة النظيفة؛ حيث يمكن لتقنيات الطاقة الشمسية الجديدة على وجه الخصوص أن توفّر مزايا أمنية مباشرة للجيش. مثلًا، بإمكان الطلاء الشمسي خفيف الوزن والمرن تحسين التنوّع التشغيلي للقوات الأمريكية، وتقليل الحاجة إلى قوافل الوقود المكلفة والضعيفة. ويقول بعض العلماء:

إنّ [وزارة الدفاع] في وضع أفضل لتحفيز الابتكار السريع في تقنيات الطاقة مقارنة بوزارة الطاقة؛ لأن الوزارة زبون رئيس للأنظمة والمعدّات المستهلكة للطاقة لما يقرب من 500 منشأة دائمة، فضلًا عن المعدات التشغيلية (حيث تُنفق على الوقود السائل وحده 10 مليارات دولار سنويًّا). حجم الموارد التي تقدّمها وزارة الدفاع لتطوير التقنية مثير للإعجاب؛ حيث توظف أكثر من 30 ألف مهندس وعالم في البحث والتطوير والمشتريات، ويصل إنفاقها السنوي على البحث والتطوير إلى قرابة 80 مليار دولار، مع إنفاق على المشتريات يزيد على 100 مليار دولار. وعليه، فإنّ وزارة الدفاع لديها الحوافز والقدرة على أن تكون زبونًا ذكيًّا ومتطلِّبًا لتقنيات الطاقة الجديدة31.

هذا النموذج ذو الشقّين للحثّ على الابتكار- تمويل تطوير التقنية وخلق سوق للمنتجات النشئة- كان ناجحًا بالنسبة إلى الجيش، ويمكنه تسريع الابتكار في تقنية الطاقة الشمسية وكذلك مجموعة من تقنيات الطاقة الأخرى اللازمة لتحقيق مستقبل الطاقة الشمسية. ومن الواضح أنّ الحكومة الفيدرالية تعاني حاليًّا نقصًا في تمويل البحث والتطوير وعرض التقنيات الجديدة، وينبغي أن تعزّز دعمها في هذا المجال.

قد نجد عذرًا لمن يفترض أنّ الحكومة تبلي بلاءً حسنًا في الجانب الآخر، نظرًا إلى أنّ دعمها لنشر الطاقة الشمسية يفوق بشكل كبير نفقاتها في البحث والتطوير والعروض التوضيحية. وقد اتضح، لسوء الطالع، أنّ سياسات الولايات المتحدة لتهيئة ظروف السوق المناسبة لازدهار الطاقة الشمسية بحاجة أيضًا إلى إصلاح.

لا ضرائب من دون ابتكار

لا تكمن مشكلة السياسات العامة الأمريكية التي تسعى لتشجيع اعتماد السوق على الطاقة الشمسية في مقدار الأموال التي تُنفق، ولكن في ما تُنفق هذه الأموال عليه. لذلك، يجب أن يكون الهدف من سياسة الطاقة الشمسية هو تشجيع الابتكار المالي والتقني والنظامي الذي يمكّن من زيادة حصّة الطاقة الشمسية بشكل كبير لتقليل تكاليف العملاء وانبعاثات الكربون في البلاد، مع تقديم مثال لما يصلح لبقية العالم. ولكنّ سياسات اليوم لا تحقق هذا حتى الآن، وحتى الاقتراحات التي حظيت بتأييد واسع لفرض ضرائب على انبعاثات الكربون لا تُعدّ الحل السحري للسياسات. لذلك، يجب أن تقترن ضريبة الكربون بدعم التقنيات الجديدة لتحفيز الابتكار بشكل أكثر فاعلية.

إن أكبر دعم فيدرالي للطاقة الشمسية في الوقت الحاضر هو ائتمان ضريبة الاستثمار الذي يُقدَّر بقيمة 30 بالمئة من التكلفة الأولية لتركيب الطاقة الشمسية. وقد مدّدت الحكومة الفيدرالية هذا الائتمان في عام 2015م حتى عام 2020م، حيث ينخفض الائتمان الضريبي عند هذه النقطة إلى 10 بالمئة على مدى العامين المقبلين. ونتيجة لذلك تتوقّع وزارة الخزانة الأمريكية أن تنفق الحكومة الفيدرالية أكثر من ملياري دولار سنويًا لدعم الطاقة الشمسية. وقد يكلّف الحافز الضريبي الفيدرالي الآخر (الذي يسمح لمالكي مشاريع الطاقة الشمسية بتطبيق جدول استهلاك سريع) 200 مليون دولار أخرى سنويًّا32.

ومع ذلك، فإنّ هذه الحوافز الضريبية تعزّز الأشياء غير الصحيحة التي تكاد تستفيد بشكل حصري من التقنيات الناضجة، وهذه معظمها من الألواح الشمسية الكهروضوئية السيليكونية. وإذا كان عليه الاختيار بين تقنية ناشئة وابتكارية وتقنية راسخة تجاريًّا، وكلاهما مؤهل بشكل متساوٍ للحصول على الائتمان الضريبي ذاته، فإن المستثمر سيختار بحكمة التقنية القائمة، حتى لو كانت التقنية الناشئة أرخص وأكثر كفاءة عند إنتاجها على نطاق واسع33.

قد يكون النهج الأفضل هو تصميم الحوافز المنخفضة بسبب انخفاض تكلفة التقنية، وإلغاء الإعانات التي لن تكون ضروري، وتركيز الدعم على نشر التقنيات الجديدة التي تحتاج إلى تعزيز مبكر. ومن شأن السياسة المتزنة أيضًا أن تخفّض الدعم للتقنيات التي فشلت في تحسين تكلفتها أو أدائها بمرور الوقت. أخيرًا، لا ينبغي صرف أي من هذه الحوافز من خلال الإعفاءات الضريبية، التي قد يكون من الصعب تحويلها لسيولة نقدية في المقام الأول. وبدلًا من ذلك يمكن أن تكون الحوافز النقدية المباشرة ذات فاعلية مضاعفة في تحفيز الانتشار من دون زيادة العبء المالي على الحكومة الفيدرالية.34 هذه كلها توجّهات سياسية واعدة بإمكان الكونغرس اتّخاذها، بدلًا من اختيار تمديد الائتمان الضريبي للاستثمار الحالي إلى ما بعد عام 2020م، والتخلص منه تدريجيًّا.

قد يجادل منتقدو إلغاء الإعفاءات الضريبية بأنّ الائتمانات كانت حاسمة لإنشاء سوق للطاقة الشمسية مزدهرة في الولايات المتحدة. والحقيقة هي أن الولايات المتحدة ركّبت خلال عام 2016م

أكثر من 40 جيجاوات من الطاقة الشمسية، وكانت تحتلّ المرتبة الثانية بعد الصين بوصفها أكبر سوق سنوية في العالم، وكان للإعانات المحلية دور كبير في هذه الإنجازات. ومع ذلك، أود أن أنتقد ذلك من الآن فصاعدًا؛ لأنّ دعم تقنية الطاقة الشمسية الحالية لن يفعل الكثير لتقليل البصمة الكربونية للولايات المتحدة، ناهيك عن العالم. وبالرغم من أنّ هذه الإنجازات ستسرّع من اليوم الذي تنتشر فيه تقنية الطاقة الشمسية الحالية لأكبر مساحة ممكنة من السوق أكثر من أيّ وقت مضى، لكن الطاقة الشمسية لن تذهب إلى أبعد من ذلك إذا لم تتحقّق أشكال مختلفة من الابتكار.

من وجهة نظر اقتصادية، فإنّ صناعة الطاقة الشمسية تعتز بإعلانها خلق أكثر من ربع مليون وظيفة في الولايات المتحدة،35 لكنّ معظم هذه الوظائف تتركز في تركيب المشاريع باستخدام الألواح الشمسية المستوردة؛ إذ يوفّر الدعم الحكومي لهذه الوظائف فوائد اقتصادية محدودة. وبالمقابل، يمكن أن تحقّق الاستثمارات في الابتكار عائدًا أعلى بكثير على الإنفاق العام، ما يوفّر ما يقرب من خمس وظائف إضافية للاقتصاد من خلال تحفيز وظيفة واحدة جديدة في التصنيع المتقدم.36 ولذلك، سيكون أيّ دعم من المنظور البيئي والاقتصادي أكثر فاعلية إذا تم توجيهه نحو الابتكار.

قد يجادل النقاد أيضًا بأنه إذا حصل الوقود الأحفوري على المليارات من الإعفاءات الضريبية، فمن العدل أن تحصل الطاقة الشمسية على إعانات مماثلة. وهذه الملاحظة تثير نقطة مهمّة؛ حيث يجب على حكومة الولايات المتحدة إلغاء الإعفاءات الضريبية لشركات النفط والغاز البالغة 4 مليارات دولار، التي لا تؤدّي في الواقع إلى تحسين أمن الطاقة في الولايات المتحدة، أو خفض الأسعار في محطات الوقود بحسب ما أظهر البحث الذي أجريته في مجلس العلاقات الخارجية.37 ومع ذلك، حتى إذا استمر دعم الوقود الأحفوري، فسيظلّ من المنطقي إصلاح دعم الطاقة الشمسية؛ لتشجيع التقنيات الجديدة المبتكرة التي ستكون أكثر قدرة على المنافسة مع الوقود الأحفوري.

وبالإضافة إلى الائتمان الضريبي الفيدرالي للاستثمار في الطاقة الشمسية، دعمت العديد من الولايات نشر الطاقة الشمسية، حيث إنّ إحدى الطرق للقيام بذلك هي من خلال تفويض يُعرف باسم "معيار محفظة الطاقة المتجدّدة renewable portfolio standard " الذي يحدّد حصّة من حصّة الكهرباء التي يجب أن تشتريها الدولة من مصادر متجدّدة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. ومرة أخرى، بإمكان هذه السياسات الادّعاء بشكل مبرّر تحقيق إنجازات مهمّة في نشر الطاقة الشمسية، وخاصّة في ولاية كاليفورنيا، ولكن كما هي الحال مع الائتمان الضريبي للاستثمار، فإنهم لا يفعلون الكثير لدعم الابتكار التقني، ويدعمون في الغالب بدلًا من ذلك نشر الألواح الشمسية السيليكونية الحالية.

علاوة على ذلك، تعرقل معايير محافظ الطاقة المتجدّدة الابتكار المنهجي من خلال التمييز ضد المصادر غير المتجدّدة التي لا تحتوي على الكربون، مثل الطاقة النووية أو المحطات الأحفورية

مع احتجاز الكربون وتخزينه، حيث يتعارض هذا التمييز مع الهدف المتمثّل في بناء مزيج متنوّع من موارد الطاقة لتمكين الإزالة العميقة للكربون. وعلى الرغم من أنّ نصيب الرياح والطاقة الشمسية يرتفع بشكل متسارع، إلا أن من المقرر في ولاية كاليفورنيا إغلاق آخر محطة نووية متبقية، في ولاية أسهمت فيها الطاقة النووية في الآونة الأخيرة بما نسبته 15 بالمئة من طاقتها، وكان ذلك في عام 2011م38.

على النقيض من ذلك، سنّت نيويورك في عام 2016م سياسات لتشجيع كلّ من الطاقة المتجدّدة والطاقة النووية بهدف الحصول على معظم كهرباء الولاية من مصادر نظيفة بحلول عام 2030م.39 إن مثل هذه السياسات، التي لا تميّز ضد الطاقة النووية وغيرها من موارد الطاقة النظيفة غير المتجدّدة، أكثر منطقية بكثير من معايير محفظة الطاقة المتجدّدة. لذلك، يتوجب على مزيد من الولايات تفعيلها لضمان تحقيق انتشار عالٍ للطاقة الشمسية من خلال استمرار وجود موارد أساسية مرنة، التي هي، كما أشار الفصل 9، محطات يمكنها رفع الإنتاج وخفضه للتعويض عن تقلب ناتج الطاقة المتجدّدة.

قد لا يكون التفويض الحكومي ضروريًّا لتشجيع نشر الطاقة المتجدّدة، حيث تُعدّ ولاية تكساس حالة مفيدة تستحق الدراسة؛ فعلى الرغم من أنّ الولاية أوصت بتحقيق 10 جيجاوات من الطاقة المتجدّدة بحلول عام 2025م، فإنّ صناعة الطاقة أولت القليل من الاهتمام للتوصيات. لقد استطاعت تكساس الوصول للهدف في عام 2012م، (على الرغم من أنّ معظم السعة المركّبة ناتجة من طاقة الرياح بدلًا من الطاقة الشمسية). كان الدافع الفعلي لنمو الطاقة المتجدّدة، بدلًا من معيار أنشطة الطاقة المتجدّدة، هو بناء تكساس لخطوط النقل التي ربطت كبرى المدن بالمناطق البعيدة التي تكثر فيها العواصف، مثل تكساس بانهاندل والمعروفة باسم "منطقة الطاقة المتجدّدة التنافسية Competitive Renewable Energy Zone (CREZ)"، وذلك لتغطية حجم الطلب، بتشجيع من خطوط نقل منطقة الطاقة المتجدّدة التنافسية. ورفع المطوّرون بحماس من سعة حجم التوليد؛ حيث تعدّ تكساس الآن أكبر مركز طاقة رياح في البلاد.40 وكان الدافع وراء نموّها هو الاقتصاد المواتي للطاقة المتجدّدة بمجرد توافر قدرة نقل كافية، بدلًا من التفويض الحكومي.

تمثل الاستثمارات التي توسّع شبكة الكهرباء نموذجًا للسياسات التي تعزّز الابتكار المنهجي لإرساء الأساس لانتشار أعلى بكثير للطاقة الشمسية في المستقبل. ولذلك، على الحكومة الفيدرالية وحكومات الولايات العمل معًا لتركيب شبكة من خطوط نقل التيار المباشر ذات الجهد العالي والبعيد في جميع أنحاء البلاد لتوسيع الوصول إلى موارد الطاقة المتجدّدة البعيدة والغنية أيضًا. لقد أعربت إدارة ترامب، بالفعل، عن حرصها على وضع مشاريع بنية تحتية جديدة على أرض الواقع. ويمكن لأي حكومة فعل ذلك من خلال ممارسة السلطة التنظيمية الفيدرالية لتسريع عملية تحديد المواقع والسماح لخطوط النقل الجديدة41.

يتعيّن على حكومات الولايات العمل معًا جنبًا إلى جنب مع هذا النوع من المبادرات لربط أسواق الطاقة الخاصّة بها، بحيث يمكن للطاقة المتجدّدة المولدة في ولاية ما أن تنتقل عبر النقل لمسافات طويلة إلى مراكز الطلب في ولايات أخرى. مثلًا، أن تمضي كاليفورنيا قدمًا في خطتها المحفوفة بالتحدّيات من أجل ربط سوق الطاقة لديها بسوق جيرانها في الغرب، حيث قد لا تضطر إلى التخلص من آلاف الميجاوات من الطاقة المتجدّدة الفائضة التي تتجاوز الطلب داخل الولاية. ويعدّ توسيع النقل وإصلاح سوق الطاقة من الخطوات التي قد تدعم التوسّع في التقنيات الحالية على المدى القريب فقط. ولكن من خلال تعزيز الابتكار المنهجي الذي يمكّن شبكة مرنة قادرة على استيعاب المزيد من الطاقة الشمسية، فإن خطوات السياسات هذه ستمهّد الطريق للتقنيات الناشئة لتتجاوز في نهاية المطاف التقنيات الحالية.

وبالمثل، على صانعي السياسة في الولايات المتحدة اتباع سياسات تحفّز الابتكار المالي أيضًا. ومرة أخرى، على الرغم من أنّ هذا النهج قد يفيد فقط التقنيات الحالية على المدى القريب، إلا أن الابتكار المالي الذي يفتح تدفّقات هائلة من رأس المال يمكن أن يجعل من الممكن توسيع نطاق التقنيات المتقدّمة بسرعة في المستقبل. أما الخطوة التي يمكن للمشرعين اتخاذها في هذا الاتجاه فهي تمرير قانون التكافؤ في الشراكة المحدودة الرئيسة MLP Parity Act. للتذكير بما ورد في الفصل الرابع، تُعدّ الشراكات المحدودة الرئيسة MLP - Master Limited Partnerships أدوات مالية تُستخدم على نطاق واسع لتمويل البنية التحتية للنفط والغاز مثل خطوط الأنابيب، ولا تدفع أي ضريبة على دخل الشركات. لقد حاولت شركات الطاقة المتجدّدة إعادة إنشاء الشراكة المحدودة الرئيسة مع نموذج شركة العوائد الخضراء الموجّه نحو النمو (تجميع مجموعة من مشاريع الطاقة المتجدّدة ليتم تداولها في سوق الأوراق المالية)، التي أخفقت وانقلبت رأسًا على عقب. لكن قانون تكافؤ الشراكة المحدودة الرئيسة، الذي قُدِّم لأول مرة في عام 2012م من قبل السناتور كريس كونز (ديمقراطي من ولاية ديلاوير) والسيناتور جيري موران (جمهوري من ولاية أركانساس)، سيمكّن المستثمرين المؤسسيين من الاستثمار في الشراكات المحدودة الرئيسة المدرجة التي تتألف من أصول الطاقة الشمسية. ومن خلال إيجاد وسائل آمنة ومجربة وحقيقية، يمكن للشراكات المحدودة الرئيسة أن تسرّع تدفّق رأس المال إلى الطاقة الشمسية.42 فإذا تمكّنت التقنيات الحديثة من تحقيق نطاق تجاري مستقبلًا، فسوف تستفيد من توافر هذا الهيكل التمويلي للاستفادة من المستثمرين المؤسسيين أصحاب الأموال الطائلة.

أخيرًا، لن تكتمل مناقشة سياسة الطاقة النظيفة من دون ذكر تسعير الكربون. إن أي ضريبة كربون، أو أي نظام تجاري ذو سقف عام لحساب التلوّث الكربوني، أو أي نظام آخر لفرض غرامات مالية على تلك الكيانات التي تسبّب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري؛ سيكون تصحيحًا مرحّبًا به في الأسواق الحالية التي لا تعاقب الملوّثين.43 وبالإضافة إلى الاتفاق السائد بين معظم الاقتصاديين على دعم مثل هذا القانون، فإن السياسيين من كلا الحزبين متفقون أيضًا على دعمهم لضريبة

الانبعاث الكربوني. فقد أقرّ مجلس النواب الأمريكي في السنة الأولى من إدارة أوباما، مشروع قانون واكسمان-ماركي Markey Bill-Waxman لوضع مخطّط للحدّ من انبعاثات الكربون وتداوله، ما جذب ثمانية جمهوريين للتصويت لصالحه (ومع ذلك، لم ينظر مجلس الشيوخ في مشروع القانون). وفي عام 2017م، قام وفد من كبار السياسيين الجمهوريين بزيارة البيت الأبيض لإقناع الرئيس ترامب بمزايا ضريبة الكربون المحايدة بالنسبة للعائد. واقترحوا فرض رسوم على انبعاثات الكربون في جميع اقتصاد الولايات المتحدة، وإلغاء مجموعة كاملة من الإعانات والتفويضات لنشر الطاقة النظيفة التي تدفع المحافظين إلى الجنون، وتقديم إعفاءات ضريبية جذّابة سياسيًّا لعائلات الطبقة العاملة.44 يبدو أن هذا الحل أنيق وفعّال، أليس كذلك؟

ربما ليس بمفرده، فكما يجادل الخبير الاقتصادي في معهد ماساتشوستس للتقنية؛ دارون أسيموغلو Daron Acemoglu وزملاؤه، فإنّ ضريبة الكربون تعالج قصورًا مهمًّا في السوق، ولكنها تترك قصورًا آخر من دون معالجة. إنها تُصحّح فشل السوق في وضع قيمة للضرر الناجم عن انبعاثات الكربون، ولكنها لم تحل مشكلة المنافسة بين مصادر الطاقة النظيفة والقذرة. ويؤدّي هذا التعديل إلى تهيئة السوق لمطابقة العرض والطلب على الطاقة بشكل فعّال من حيث التكلفة مع الحدّ من التلوّث.

ومع أنّ هذه السياسة مثالية لتوجيه التقنيات الحالية بكفاءة، إلا أنها ليست مثالية لتسريع الابتكار.45 إن غياب الدعم الحكومي للبحث والتطوير -الذي يخلق المعرفة العلمية والملكية الفكرية لصالح الجميع، ولكن السوق لا تقدّرها بالكامل- يجعل الابتكار التقني يتقدّم بوتيرة أبطأ مما يحدث بوجود الدعم الحكومي. وقد وجد أسيموغلو وزملاؤه أنّه حتى مع وجود سعر على الكربون، فإنّ تأخير الاستثمار في الابتكار التقني يمكن أن يؤدّي إلى انتكاس انتقال الطاقة النظيفة، ويرفع من تكلفتها بشكل حاد46.

يُعدّ تسعير الكربون سياسة رائعة ومهمّة، لكنها ليست بأيّ حال من الأحوال حلًّا سحريًّا. وبدلًا من ذلك، فإن السياسات المثالية للترويج الذكي للطاقة النظيفة في الولايات المتحدة من شأنه أن يوجّه جزءًا كبيرًا من العائدات من ضريبة الكربون على الصعيد الوطني لتعزيز التمويل للابتكار التقني. وقد تكون هذه السياسة صفقة كبرى من شأنها تبادل التفويضات غير الفعّالة ودعم الطاقة النظيفة بضريبة كربون واحدة. (الأهم من ذلك أنّ اللوائح البيئية، مثل ضوابط التلوّث على محطات توليد الطاقة بالفحم، التي تبررها المخاوف الصحية، يجب أن تظلّ قائمة). قد يظلّ هذا النهج الجديد مستساغًا سياسيًّا، مع ترك أموال كبيرة لتعويض الجهات الأكثر تضررًا من ضريبة الكربون. ومن الأهمية بمكان أن تُعطى الأولوية لدعم الابتكار في مجال الطاقة في مثل هذه الصفقة الكبرى، وخلاف ذلك قد تتخلى الولايات المتحدة عن التقنيات التي تغيّر قواعد اللعبة التي تحتاجها هي ويحتاجه العالم.

تنفيذ بعثة الابتكار

لن أنسى أبدًا مؤتمر باريس لتغيّر المناخ في عام 2015م؛ فلمدّة أسبوعين تركز اهتمام العالم على الدبلوماسيين الذين كانوا يصيغون اتفاقًا تاريخيًّا. لمحت وزير الخارجية الأمريكي جون كيري وهو يخرج من غرفة المفاوضات في منتصف الليل. كان نشيطًا إلى حدّ ما مقارنة بموظفيه الذين ساروا خلفة وهم يقاومون النعاس. حمل برج إيفل المضاء بتوهّج الرسالة المشؤومة: "لا توجد خطة ب". أخيرًا، تكاتف الوزراء المرهقون في اليوم الأخير في لحظات الانتصار، بعد أن وقّعوا اتفاقية غير ملزمة للحدّ من ظاهرة الاحتباس الحراري إلى 2 درجة مئوية. وضعت تلك الاتفاقية إطارًا لدول العالم للحدّ من انبعاثاتها الكربونية، ومحاسبة بعضها بعضًا، ورفع سقف طموح أهدافها مع مرور الوقت.

لكن، على الرغم من كلّ هذه الدراما، فإنّ أهم عنصر في قمّة باريس حُدِّد في اليوم الأول، على هامش المفاوضات الرسمية. في ذلك اليوم، كشف الثلاثي بيل جيتس والرئيس أوباما ورئيس الوزراء الهندي ناريندرا مودي الستار عن مبادرة لتعزيز الابتكار العالمي في مجال الطاقة: بعثة الابتكار Mission Innovation. أخيرًا، سجّل عشرون من قادة العالم لمضاعفة التمويل العام لبلدانهم للبحث والتطوير في مجال الطاقة خلال خمس سنوات، وتعهّد 28 مليارديرًا بقيادة جيتس باستثمار المليارات لجلب تقنيات طاقة متطوّرة إلى السوق.

كان هذا هو الإنجاز الحاسم الذي حدث في باريس. إنّ تطوير تقنيات متفوقة جذريًّا هو ما سيمكن الدول من تقديم تعهّدات طموحة على نحو متزايد بشأن الانبعاثات الكربونية، وسيتعين على القطاعين العام والخاص العمل معًا لتحقيق الوعد بتسريع الابتكار.

لسوء الطالع، هددت الإجراءات المبكرة لإدارة ترامب بالتراجع عن التقدّم الأخير؛ حيث أعلن ترامب في يونيو 2017م، عن نيّته سحب الولايات المتحدة من اتفاقية باريس في عام 2020م. لقد قضى الالتزام بهذا التعهّد على النوايا الحسنة الدولية التي اكتسبها الرئيس أوباما والوزير كيري من التفاوض على الاتفاقية، ما ألحق الضرر بمصداقية الولايات المتحدة بشأن الطاقة العالمية وقضايا المناخ (ودمّر رأس المال الدبلوماسي الذي تحتاجه أمريكا لدفع أولويات السياسة الخارجية الأخرى). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ تصميم الرئيس ترامب على التراجع عن التزام الولايات المتحدة بمضاعفة إنفاقها على البحث والتطوير، هدّد بمزيد من تراجع مصداقية الولايات المتحدة بوصفها قائدًا في مجال ابتكار الطاقة. بالمقابل، رأينا دولًا أخرى، بما في ذلك الصين، تتوق إلى تعزيز الابتكار بدلًا من أمريكا، على الرغم من زيادة تمويل البحث والتطوير في الداخل، وتنسيق اتجاه ابتكار الطاقة في الخارج47.

لقد أثبتت الأحداث خطأ سياسة ترامب، ذلك أن استبعاد ابتكار الطاقة من سياسة أي إدارة أمريكية سيؤدي في نهاية المطاف إلى وضع الولايات المتحدة في مؤخرة دول العالم. إن لدى الولايات

المتحدة أسبابًا مقنعة للقيادة دوليًّا في مجال ابتكار الطاقة، وعلى وجه الخصوص، فإنّ إعادة تشكيل الطاقة الشمسية إلى صناعة عالمية تعتمد على التقنية من شأنه أن يستفيد من نقاط القوة الأمريكية ويعزّزها. يتركز إنتاج الطاقة الشمسية ونشرها اليوم في آسيا، وقد أثبت الجمع بين المقياس الصيني وتقنية الطاقة الشمسية السيليكونية المجربة والحقيقية أنه لا يهزم حتى الآن. لذلك، على الولايات المتحدة عدم المحاولة والتغلب على الصين في مجال تخصصها.

بدلًا من ذلك، على الولايات المتحدة أن تقود حملة عالمية لتسويق تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة. لقد حثثت أنا وزميلي دان سانشيز Dan Sanchez من جامعة ستانفورد الولايات المتحدة على مشاركة الدروس مع البلدان الأخرى من تجربتها في إنشاء وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة لدعم التقنيات المبتكرة.48 وقد اقترح باحثون في جامعة كولومبيا مبادرة لبعض كبار مموّلي البحث والتطوير في مجال الطاقة الشمسية، من الولايات المتحدة وكوريا الجنوبية واليابان وألمانيا؛ وذلك لتبادل المعلومات وتنسيق أولويات التمويل الخاصّة بهم لتطوير تقنيات الطاقة الشمسية الجديدة بسرعة. والأهم من ذلك أنّ مثل هذا التعاون سيشمل بشكل وثيق شركات القطاع الخاص، ويشجّعها على استثمار أموال الشركات في البحث والتطوير، والسعي لجلب تقنيات جديدة إلى السوق49.

يصب التعاون البحثي الدولي السابق للتنافس في صالح نقاط قوة الولايات المتحدة، بسبب وفرة العلماء والمهندسين الموهوبين والشركات المبتكرة الجريئة، حيث تتعاون الشركات الأمريكية مع المنافسين الدوليين طوال الوقت في مجال صناعة أشباه الموصلات، وغالبًا ما تتقاسم التكلفة الرأسمالية للبحث والتطوير والمصانع؛ حتى تتمكن من الاستثمار بشكل متناسب مع عائداتها في دفع عجلة الابتكار. وتستطيع الولايات المتحدة من خلال قيادة جهود تعاون كبيرة في مجال أبحاث الطاقة الشمسية، غرس المعايير التي تفتقر إليها صناعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية العالمية حاليًا. مثلًا، تستثمر أي شركة صينية متوسطة للطاقة الشمسية 1٪ فقط من إيراداتها في البحث والتطوير، في حين أن متوسط شركة أشباه الموصلات الأمريكية تستثمر أكثر من عشرة أضعاف هذا المبلغ50.

قد يزعم الرافضون أن صناعة الطاقة لن تشبه أبدًا قطاع التقنية الفائقة. لكن ما يغيب عن أذهانهم هو أن شركات المرافق العامة العملاقة والمملوكة للدولة تهيمن على سوق الطاقة، وتؤثر في سياساته، كما أن منتجات هذا القطاع- كيلوواط/ساعة من الكهرباء أو جالون من البنزين- هي سلع ذات هامش ربح منخفض. على النقيض من ذلك، تتمتع شركات التقنية بالذكاء، وتكتب قوانينها وهي تتقدم، وتستخدم الهوامش العالية من رقائق الحاسوب، وأجهزة الآيفون، وما شابه ذلك لتمويل البحث والتطوير المستمرين.

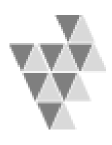
قد يكون من الأفضل بدلًا من ذلك، كما قد يقول النقاد، استخدام سياسات تجارية صارمة لحماية مصنّعي الطاقة الشمسية المحليين المحاصرين بالواردات الصينية الرخيصة. وبالفعل، فقد فرضت

الولايات المتحدة، وهي على حقّ، تعريفات جمركية للردّ على إغراق الصين لسوق الطاقة الشمسية ما قضى على الشركات الناشئة المبتكرة في وادي السيليكون. وكانت الإدارة الأمريكية قد فرضت رسومًا كبيرة على الخلايا والألواح الشمسية المصنوعة من السيليكون المستوردة من الصين، استنادًا إلى المادة 201 من قانون التجارة لعام 1974م الذي نادرًا ما يُفعّل. لكنّ العوائق التجارية أدوات فظة ومدمّرة ويجب أن تكون مجرد عنصر صغير في إستراتيجية الابتكار الأمريكية. وإذا ما اعتُمدت بشكل متهور، فيمكنها أن تثير حروبًا تجارية قد تعيق فرص الولايات المتحدة في تولي قيادة صناعة مبتكرة ذات سلسلة إمداد عالمية يمكن أن من خلالها السلع والخدمات ورؤوس الأموال بكفاءة عبر الحدود51.

على أمريكا بدلًا من التراجع داخل حدودها، أن تغتنم الفرصة لإعادة تشكيل صناعة الطاقة الشمسية العالمية في صورتها المبتكرة. صحيح أن هناك اختلافات مهمّة بين الألواح الشمسية وأشباه الموصلات، وقد لا يُترجم نموذج الأعمال الخاص بالأخير تمامًا إلى الأول. ولكنّ هذا ليس عذرًا لقبول ثقافة الصناعة الحالية الخاصّة بالتقدّم التقني البطيء بشكل مؤلم، لا سيّما بالنظر إلى التطوّرات المثيرة الناشئة من أفضل المختبرات في جميع أنحاء العالم.

تذكر أنّ مشوار الطاقة الشمسية العظيم لم ينتهِ بعد. إنّها مجرد بداية؛ فلتحقيق الأهداف التي حدّدها هذا الكتاب، يجب أن تنمو الطاقة الشمسية أكثر من ثلاثين ضعفًا بحلول منتصف القرن، وأكثر من ذلك بكثير بعد هذا الأفق. وعلى الرغم من أنّ الولايات المتحدة تجد نفسها في وضع غير مواتٍ أمام السبق الصيني المبكر، إلا أنها تستطيع استعادة حصّتها في السوق، وتقديم تقنيات إنقاذ الكوكب من خلال قيادة دفعة عالمية نحو الابتكار.

لقد أمضيت عقدًا من الزمن في دراسة الطاقة الشمسية، وبالكاد يمكن التعرّف على صناعة اليوم من تلك التي بدأت بها، ولكن لكي تتمكّن البشرية بالفعل من ترويض الشمس، يجب أن يصبح التعرف على تقنية الطاقة الشمسية وصناعة الطاقة الشمسية أكثر صعوبة في العقود القادمة. حاليًا، هذا هو المستقبل الذي أتطلع إليه.



قائمة المصطلحات

المصطلحات العلمية

- التيار المتردّد ((AC) Alternating current): تيار كهربائي يعكس اتجاهه عدّة مرات في الثانية، ويستخدم بوجه عام تقريبًا في شبكات الكهرباء الحديثة، وغالبًا ما يتمّ توصيل الألواح الكهروضوئية الشمسية بشبكة من خلال عاكس يحوّل التيار المباشر (DC) إلى كهرباء التيار المتردّد.

- فجوة النطاق (Bandgap): خاصّية لأشباه الموصلات تحدّد مقدار الطاقة التي يجب أن يكتسبها الإلكترون، على سبيل المثال من ضوء الشمس؛ للتخلص من ذرّة مضيفة، والمساهمة في تيار كهربائي. تستخدم تصميمات الخلايا الشمسية الأكثر كفاءة طبقات متعدّدة من أشباه الموصلات، لكلّ منها فجوة نطاق مُحسَّنة لتسخير طاقة جزء من طيف ألوان الشمس.

- التيار (Current): تيار شحنة كهربائية، يرتبط تيار الخلية الكهروضوئية الشمسية بعدد الإلكترونات المتدفّقة من الخلية.

- تيار مباشر (Direct current DC): تيار كهربائي يسري في اتجاه واحد؛ تُعد كهرباء التيار المستمر أكثر كفاءة في النقل من التيار المتناوب (AC)، مفي الوقت الحالي فإن من الاقتصاد فقط نقل التيار المستمر عبر مسافات طويلة جدًّا (مئات الأميال أو أكثر). تنتج الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV) الكهرباء بالتيار المستمر.

- الإلكترون (Electron): جسيم أولي دون ذرّي مشحون سالبًا، يرتبط عادةً بنواة الذرّة موجبة الشحنة، ومصدر التيار الكهربائي عند التحرّك بحرية.

- الطاقة (Energy): القدرة على القيام بالعمل؛ تأتي الطاقة في العديد من الأشكال القابلة للتحويل، بما في ذلك الطاقة الحركية والكيميائية والجهد والحرارية والكهربائية والإشعاعية (من الضوء)، تُقاس الطاقة الكهربائية بالكيلوواط/ساعة (kWh).

- كثافة الطاقة (Energy density): مقدار الطاقة المخزّنة لكل وحدة حجم (في الاستخدام العامي، غالبًا ما يستخدم هذا المصطلح للإشارة إلى كمّية الطاقة المخزّنة لكل وحدة كتلة؛ على سبيل المثال في بطارية).

- كيلوواط/ساعة (kWh) hour-Kilowatt)): كمّية الطاقة الكهربائية التي يتم توصيلها بمقدار 1000 واط (W) على مدى ساعة واحدة، كمرجع، تستهلك الأسرة الأمريكية النموذجية ما يقرب من 900 كيلو وات في الساعة من الكهرباء شهريًّا.

- الفوتون (Photon): جسيم أولي يعدّ المكوّن الأساسي للضوء (يُعرف أيضًا بالإشعاع الكهرومغناطيسي)، ويحمل كمّية من الطاقة تتناسب مع تردّده.

- الطاقة (Power): كمّية الطاقة المنتجة أو المستهلكة لكلّ وحدة زمنية؛ حيث إنّ خرج الطاقة لخلية الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) هو المنتج الفوري للتيّار والجهد الكهربي، وتُقاس الطاقة الكهربائية بالواط (W).

- أشباه الموصلات (Semiconductor): مادّة يمكنها التبديل بين عازل وموصل للكهرباء. في الخلايا الشمسية الكهروضوئية (PV)، ينقل ضوء الشمس الطاقة إلى إلكترونات شبه موصلة، والتي تتدفّق بعد ذلك من الخلية كتيار كهربائي. السيليكون هو أشباه الموصلات الأكثر استخدامًا للخلايا الشمسية، وكذلك للأجهزة الإلكترونية الأخرى مثل رقائق الحاسوب.

- الجهد (Voltage): مقدار الطاقة، لكلّ وحدة شحنة كهربائية تحرّك تيارًا كهربائيًا في الدائرة، ويرتبط جهد الخلية الكهروضوئية (PV) بكمّية الطاقة الموجودة في كل إلكترون يتدفق خارج الخلية.

- واط (W) Watt)): وحدة طاقة كهربائية؛ كمرجع، يستهلك المصباح المتوهّج التقليدي 60 واط من الطاقة بشكل مستمر عند تشغيله، وتنتج لوحة شمسية نموذجية ما يصل إلى 300 واط في منتصف النهار. تشمل وحدات الطاقة الأخرى الشائعة الاستخدام كيلوواط (كيلو واط 1000 واط)، ميغاواط (ميغاواط، مليون واط)، وجيغاواط (جيغاواط، 1 مليار واط). يمكن لأكبر مزارع الطاقة الشمسية إنتاج مئات ميغاوات من الطاقة.

مصطلحات صناعة وتكنولوجيا الطاقة الشمسية

- السيليكون غير المتبلور (Amorphous silicon): مادة كهروضوئية شمسية (PV) يمكن استخدامها لصنع خلايا شمسية مرنة ورقيقة ورخيصة، على الرغم من أنّ هذه الخلايا أقلّ كفاءة من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري.

- الكادميوم تيلورايد (CdTe) Cadmium telluride)): مادّة كهروضوئية شمسية (PV) تترسّب كغشاء رقيق. على الرغم من أنّ أكثر من 90 بالمئة من جميع الألواح الشمسية تعتمد على تقنية

السيليكون، فإنّ معظم الباقي مصنوع من CdTe. شركة First Solar الأمريكية هي أكبر شركة مصنعة للألواح الشمسية CdTe.

- التجاري والصناعي (I&C) Commercial and industrial)): أحد قطاعات السوق لنشر أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، عادة ما تكون أنظمة I&C أصغر من 2 ميغاواط، ويمكن تركيبها على أسطح المنازل الكبيرة للشركات أو المستودعات أو تركيبها على الأرض.

- مشاريع الطاقة الشمسية المجتمعية (Community solar): حيث يمكن للمستهلكين التجمّع معًا لامتلاك أو تأجير تركيبات شمسية جماعية، غالبًا على نطاق عدة ميغاوات (MW)، واستخدام الطاقة المولدة لتعويض مشترياتهم من الطاقة من الشبكة.

- الطاقة الشمسية المركزة (CSP) Concentrated solar power)): تقنية شمسية تستخدم المرايا لتركيز ضوء الشمس لتوليد حرارة، ويمكن استخدامها بعد ذلك لتشغيل التوربينات وتوليد الكهرباء. على الرغم من وجود العديد من تكوينات CSP، حيث يركز مجال من المرايا ("هليوستات" heliostats) ضوء الشمس على قمّة البرج المركزي وهو تصميم يحضى بشعبية؛ حيث يتوافق هذا التصميم مع تخزين الطاقة الحرارية الذي يمكّن محطة الطاقة الشمسية المركزة من إنتاج الكهرباء في الليل.

- النحاس الإنديوم الغاليوم سيلينيد الثنائي ((Copper indium gallium (di)selenide (CIGS): مادة كهروضوئية شمسية (PV) تترسّب على شكل غشاء رقيق؛ حاولت العديد من الشركات الناشئة في وادي السيليكون، بما في ذلك سوليندرا، تسويق هذه التقنية ولكنّها فشلت.

- الطاقة الشمسية الموزّعة (Distributed solar): استخدام الألواح الشمسية الكهروضوئية على أسطح المنازل أو في ترتيب مثبّت على الأرض أصغر من مشروع على نطاق واسع؛ يمكن وضع مشاريع الطاقة الشمسية الموزّعة بالقرب من مكان استخدام الطاقة التي تولدها.

- الكفاءة (Efficiency): بالنسبة إلى خلية الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، فإنّ الكفاءة هي النسبة المئوية للطاقة الفعلية الناتجة من ضوء الشمس التي تحوّلها الخلية إلى كهرباء -بدءًا من عام 2017م، تبلغ الكفاءة القياسية لخلية شمسية من السيليكون 26 بالمئة، وسجل متعدّد- تبلغ نسبة خلية الوصلة المكوّنة من عدة طبقات 46 بالمئة، وتبلغ الكفاءة القياسية لمحطة الطاقة الشمسية المركزة (CSP) 31 بالمئة من تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء. بالنسبة إلى الخلية الكهروكيميائية الكهروضوئية (PEC)، فإن الكفاءة هي النسبة المئوية للطاقة في ضوء الشمس التي يتم تحويلها إلى وقود هيدروجين، الرقم القياسي هو 22 بالمئة.

- تعريفة التغذية آلية (Feed-in tariff): سياسة مصمّمة لجذب الاستثمار في تقنيات الطاقة المتجدّدة من خلال تقديم عقود طويلة الأجل لشراء الطاقة بسعر ثابت من مشاريع الطاقة المتجدّدة؛

يعتمد السعر عادة على تكلفة تلك التقنية وليس على سعر السوق السائد للكهرباء، وقد أثّر مخطط تعريفة التغذية في ألمانيا بصورة مهمة في دفع نمو صناعة الطاقة الشمسية في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين.

- زرنيخيد الغاليوم (GaAs) Gallium arsenide)): مادّة شمسية ضوئية (PV) يمكن من خلالها صنع خلايا شمسية أكثر كفاءة من خلايا السيليكون. على الرغم من أنّ الألواح الشمسية المصنوعة من GaAs وأشباه الموصلات الأخرى أكثر شيوعًا من ألواح السيليكون للتطبيقات الفضائية، إلا أنها باهظة الثمن للغاية بالنسبة إلى النشر الاقتصادي على الأرض.

- المحوّل (Inverter): جهاز إلكتروني يحوّل التيار الكهربائي المباشر (DC) إلى تيار كهربائي بديل (AC). يتم توصيل الألواح الكهروضوئية الشمسية بالشبكة من خلال محوّلات.

- ائتمان ضريبة الاستثمار (ITC) Investment tax credit)): إعانة من الحكومة الفيدرالية الأمريكية لتركيب بعض مشاريع الطاقة المتجددة، بما في ذلك مشاريع الطاقة الشمسية. الدعم هو ائتمان ضريبي بقيمة 30 بالمئة من التكلفة الأولية لتركيب الطاقة الشمسية، ومن المقرّر أن ينخفض إلى 10 بالمئة بحلول عام 2022م.

- صافي القياس (Net metering): سياسة يقوم بموجبها عملاء الكهرباء الذين يولدون الكهرباء الخاصة بهم بإرسالها إلى الشبكة -على سبيل المثال، خلال النهار عندما تولد الألواح الشمسية على الأسطح الطاقة - وتعويض تكلفة استهلاك الكهرباء من الشبكة في أوقات أخرى، مثل الليل.

- خارج الشبكة (grid-Off): أصغر قطاعات السوق لنشر أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV). عادة ما تُركَّب أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة، والتي يمكن أن تكون صغيرة مثل لوحة شمسية واحدة، في مناطق من العالم النامي ذات اتصال محدود أو معدوم بشبكة رئيسة.

- الخلايا الشمسية العضوية (Organic solar cell): تقنية الخلايا الشمسية تعتمد على البوليمرات العضوية التي يمكن أن تتيح يومًا ما خلايا شمسية غير سامة ومرنة وملوّنة وشبه شفافة، بدءًا من عام 2017م، بلغت الكفاءة القياسية للخلايا الشمسية العضوية 12 بالمئة.

- الدفع حسب الاستخدام (PAYG) go-you-as-Pay)): نظام للعملاء للدفع مقابل الطاقة من أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة بشكل مستمر، بدلًا من دفع تكلفة النظام مقدّمًا؛ تستخدم الشركات الناشئة بشكل متزايد عروض PAYG لتسويق أنظمة الطاقة الشمسية المنزلية للعملاء الريفيين في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى وجنوب آسيا، وهذا يتطلّب من الشركات الناشئة إيجاد مصادر لرأس المال لتمويل التكلفة الأولية لأنظمة الطاقة الشمسية.

- بيروفسكايت (Perovskite): مادّة كهروضوئية شمسية صُنعت خلايا شمسية منها بكفاءة بنسبة 22 بالمئة بدءًا من عام 2017م، ويمكن لهذه التقنية أن تتيح استخدام خلايا شمسية منخفضة التكلفة ومرنة وعالية الكفاءة، ولكنها الطريقة الأكثر احتمالية على المدى القريب للوصول إلى المجال التجاري، وهي وضع طبقة من البيروفسكايت فوق خلايا السيليكون الشمسية الموجودة لزيادة كفاءتها.

- خلية كهروكيميائية ضوئية (PEC) Photoelectrochemical cell)): جهاز يستخدم الطاقة المتضمنة في ضوء الشمس لتقسيم الماء وإنتاج وقود الهيدروجين؛ تتكوّن الخلية الكهروكيميائية الضوئية من قطبين ضوئيين مكدّسين، كل منهما مغطىً بمحفّز يسرّع إنتاج الهيدروجين أو الأكسجين، وغشاء يفصل نواتج التفاعل.

- تقنية الخلايا الكهروضوئية (PV) Photovoltaics)): لتحويل طاقة ضوء الشمس إلى كهرباء باستخدام الخلايا الكهروضوئية الشمسية المصنوعة من أشباه الموصلات التي تظهر جهدًا كهربائيًا وتيارًا عند التعرّض للضوء. تشكّل العديد من الخلايا الكهروضوئية الشمسية المتصلة معًا لوحة كهروضوئية شمسية، وهي لبنة بناء نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

- اتفاقية شراء الطاقة (PPA) purchase agreement-Power)): عقد بيع الكهرباء؛ يتم التعاقد على معظم مشاريع الطاقة الشمسية على نطاق المرافق من خلال اتفاقيات شراء الطاقة لبيع الطاقة إلى مرفق لمدّة خمسة عشر عامًا أو أكثر، مما يوفّر الثقة من الإيرادات المستقبلية للمطوّر الذي يتحمّل مخاطر تمويل وبناء مشروع للطاقة الشمسية.

- الخلية الشمسية ذات النقطة الكمومية Quantum dot solar cell)): جهاز للطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، يتكوّن من جسيمات أشباه موصلات لا يتجاوز قطرها بضعة نانومترات. بدءًا من عام 2017م، بلغت الكفاءة القياسية لخلية شمسية ذات نقطة كمومية 13٪.

- سكني (Residential): أحد قطاعات السوق لنشر أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV). عادةً ما يتم تثبيت الأنظمة السكنية فوق سطح المنزل، وتكون أصغر من 50 كيلووات.

- السيليكون (Silicon): شبه موصّل تُصنع منه جميع الخلايا الشمسية الكهروضوئية (PV) تقريبًا، بالإضافة إلى الأجهزة الإلكترونية مثل الرقائق الدقيقة، وبعد تعدين السيليكون، يُنقّى إلى بولي سيليكون، ويُصب في سبائك أسطوانية، ويُقطّع إلى شرائح رقيقة، ثم يُعالج لصنع خلايا شمسية.

- التكاليف غير المباشرة (Soft costs): التكاليف غير المادّية المرتبطة بنشر الطاقة الشمسية، وتشمل هذه التكاليف التصاريح والتمويل والتركيب بالإضافة إلى اكتساب عملاء جدد ودفع الموردين، ويمكن أن تمثّل هذه التكاليف أكثر من نصف تكلفة تركيب الطاقة الشمسية السكنية.

- نظام الطاقة الشمسية المنزلية (SHS) Solar home system)): يستخدم عادة في العالم النامي لتزويد المنازل الريفية بالطاقة غير الموصولة بشبكة رئيسة. يجمع نظام الطاقة الشمسية المنزلية بين الألواح الشمسية التي تصل إلى 300 واط (W) من قدرة توليد الطاقة مع البطاريات والإلكترونيات والأجهزة الموفّرة للطاقة.

- تُعرف الألواح الشمسية (Solar panel) أيضًا باسم الوحدة النمطية، وهي الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV) وهي لبنة البناء الأساسية للنظام الشمسي، وتتكوّن من العديد من الخلايا الشمسية المتصلة بعضها ببعض.

- الأقمار الصناعية التي تعمل على الطاقة الشمسية (Solar power satellite): تقنية قيد الدراسة لتسخير الطاقة الشمسية خارج الغلاف الجوي للأرض وإرسالها إلى سطح الكوكب، في شكل موجات دقيقة، لاستخدام الكهرباء الأرضية.

- خلية شمسية ترادفية (Tandem solar cell): خلية كهروضوئية (PV) تتكوّن من طبقتين شبه موصلة؛ واحدة مُحسَّنة لامتصاص الضوء عالي التردّد، والأخرى لامتصاص الضوء منخفض التردّد. وبصورة عامة، يمكن للخلية الشمسية متعدّدة الوصلات أن تستخدم طبقتين أو أكثر لتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء بكفاءة أكبر مما تستطيعه طبقة واحدة من أشباه الموصلات.

- شرائح رقيقة (Thin film): تُعدّ فئة من تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية -بما في ذلك النحاس الإنديوم الغاليوم (ثنائي) سيلينيد (CIGS)، والكادميوم تيلورايد (CdTe)، والسيليكون غير المتبلور- استنادًا إلى ترسّب المواد بسُمك بضعة ميكرومتر فقط.

- نطاق المرافق (scale-Utility): أكبر قطاعات السوق لنشر أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV). تتراوح المشاريع على نطاق المرافق من عدة مئات من ميغاواط من قدرة توليد الطاقة، وعادة ما يتعاقد أصحابها لبيع الطاقة الشمسية إلى مرفق بسعر ومدة محدّدين.

- انكماش القيمة (Value deflation): انخفاض قيمة الكهرباء المولدة من الألواح الشمسية الكهروضوئية؛ حيث يتصل المزيد منها بالشبكة، وتزود الكهرباء الزائدة عن الطلب في منتصف اليوم.

المصطلحات العامة للطاقة

- البطارية (Battery): الأجهزة الكهروكيميائية التي تخزّن الطاقة الكهربائية وتحرّرها باستخدام التفاعلات الكيميائية. تشتهر بطاريات الليثيوم أيون التي تعمل عن طريق نقل أيونات الليثيوم بين قطبين كهربائيين، بشعبية متزايدة لتشغيل المركبات الكهربائية، وكذلك للاستخدامات الثابتة مثل

تثبيت شبكة الكهرباء. توجد العديد من تصميمات البطاريات الأخرى أو هي قيد التطوير؛ من بطاريات الرصاص الحمضية الراسخة إلى بطاريات التدفق الواعدة.

- السعة (Capacity): مقدار الطاقة الكهربائية التي يمكن أن تولدها محطة توليد الكهرباء، وتُقاس نموذجيًّا بالميجاوات (MW). يمكن لمحطات الطاقة التقليدية، مثل تلك التي تستخدم الوقود الأحفوري، أن تنتج باستمرار قدرًا من الطاقة قريبًا من قدرتها، في حين أن المصادر المتقطعة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، لا تنتج إلا بسعتها المقدرة عندما يسمح الطقس بذلك.

- أسواق القدرة الاستيعابية (Capacity markets): أُنشئت أسواق اقتصادية لضمان موثوقية شبكة الكهرباء من خلال مطالبة عملاء الكهرباء بالدفع لاحتياطي قدرة توليد الطاقة من محطات الطاقة في السنوات المقبلة.

- التقاط الكربون واستخدامه وتخزينه (Carbon capture, utilization, and storage): عملية تلتقط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من مصادر مثل محطات الطاقة التي تعمل بالفحم، وتقوم إما بتخزينه أو إعادة استخدامه؛ حتى لا يدخل الغلاف الجوي. يمكن استخدام ثاني أكسيد الكربون لتوليد قيمة اقتصادية -على سبيل المثال، عن طريق تحسين استخراج النفط أو العمل كمدخل للمواد الخام لإنتاج البلاستيك أو الأسمنت- ويمكن تخزينه بشكل دائم في التكوينات الجيولوجية.

- إزالة الكربون (Decarbonization): القضاء على انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (التي يعدّ ثاني أكسيد الكربون أكثرها انتشارًا) من الاقتصاد العالمي.

- استجابة الطلب (Demand response): تعديل طلب العملاء على الكهرباء لتقليل الضغط على الشبكة ومواءمة الطلب الكهربائي بشكل أفضل مع العرض؛ على سبيل المثال من مصادر متقطعة مثل الطاقة الشمسية. تتضمن الإستراتيجيات حوافز مالية وبرامج سلوكية لتشجيع تحوّلات الطلب بالإضافة إلى التحكم المباشر في المرافق في أجهزة العميل.

- تحلية المياه (Desalination): تقنية تستهلك الطاقة بشكل كثيف، تعمل على إزالة الملح من المياه المالحة لإنتاج مياه الشرب.

- موارد الطاقة الموزّعة (Distributed energy resources): معدّات لا مركزية ومحلية لتوليد الكهرباء أو تخزينها أو استخدامها، بما في ذلك مولّدات الديزل، والألواح الشمسية على الأسطح، وخلايا الوقود، والبطاريات، والأجهزة الذكية.

- التوزيع (Distribution): المرحلة الأخيرة في توصيل الطاقة الكهربائية، والتي تنقل الكهرباء من نظام النقل إلى العملاء الأفراد؛ يشتمل نظام التوزيع على المحطات الفرعية التي تعمل على خفض الجهد وخطوط التوزيع التي توفّر الطاقة للعملاء.

- مركبة كهربائية ((EV) Electric vehicle): مركبة تعتمد على محرّك كهربائي واحد أو أكثر للدفع بدلاً من محرّك احتراق داخلي. يتم تشغيل معظم المركبات الكهربائية بوساطة بطاريات ليثيوم أيون مشحونة، على الرغم من أنّ المركبات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود تستهلك وقود الهيدروجين لإنتاج الكهرباء التي تدير بعد ذلك محرّكات السيارة.

- التحليل الكهربائي (Electrolysis): استخدام الكهرباء لتقسيم مادة ما. في التحليل الكهربائي للماء، يقوم جهاز يسمّى المحلّل الكهربي بتشغيل تيار كهربائي عبر الماء لتقسيمه إلى أكسجين ووقود هيدروجين.

- تخزين الطاقة (Energy storage): عملية تخزين الطاقة، أو تحويلها من شكل إلى آخر، لاستخدامها فيما بعد. تشمل تقنيات تخزين الطاقة المستخدمة - أو قيد التطوير للاستخدام المستقبلي - في قطاع الطاقة الكهربائية، التخزين المائي الذي يتمّ ضخّه، والبطاريات الكهروكيميائية، وتخزين الطاقة المغناطيسية فائقة التوصيل، والمكثّفات الفائقة، وعجلات الطيران، والهواء المضغوط، وتخزين الطاقة الحرارية تحت الأرض.

- محطات توليد الطاقة ذات القاعدة المرنة (Flexible base): يمكنها توليد الكهرباء باستمرار ولكن يمكنها أيضًا تعديل إنتاجها من الطاقة للتعويض عن تقلبات الطاقة المتجددة، وتشمل هذه الموارد المفاعلات النووية ومحطات الطاقة الكهرومائية مع خزانات التخزين ومحطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري.

- الوقود الأحفوري (Fossil fuel): وقود يتكوّن من كائنات حيّة قديمة متحلّلة تحتوي على نسبة كبيرة من عنصر الكربون. الوقود الأحفوري - الذي يشمل الفحم والغاز الطبيعي والبترول - يمثّل الغالبية العظمى من استخدامات الطاقة البشرية، وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري الناتجة من احتراقها من قبل البشر هي أكبر مساهم في تغيّر المناخ العالمي.

- خلية الوقود (Fuel cell): جهاز يحوّل الطاقة الكيميائية من وقود، مثل الهيدروجين، إلى كهرباء، باستخدام تفاعل كهروكيميائي (على عكس محرك الاحتراق الذي يحرق الوقود). تشمل تطبيقات خلايا الوقود تشغيل المركبات الكهربائية وكذلك توفير الكهرباء للشبكة أو مباشرة للمستخدمين النهائيين.

- تيار مباشر عالي الجهد ((HVDC) voltage direct current-High): تقنية لنقل الكهرباء لمسافات طويلة (مئات الأميال أو أكثر) لتقليل فقد الطاقة في أثناء النقل وتقليل التكاليف. يتم تطبيق مصطلح التيار المباشر فائق الجهد (UHVDC) على الخطوط التي تعمل بجهد 1 مليون فولت أو أكثر.

- الهيدروجين (Hydrogen): وقود غازي عديم اللون يطلق الطاقة عند دمجه مع الأكسجين لتكوين الماء، إما كهروكيميائيًّا في خلية وقود أو من خلال الاحتراق. يعتمد معظم إنتاج وقود الهيدروجين اليوم على الوقود الأحفوري مثل الغاز الطبيعي، ولكن يمكن تسخير الطاقة الشمسية لتقسيم المياه وإنتاج الهيدروجين. إذا أُنتج بهذه الطريقة، يمكن استخدام وقود الهيدروجين من دون التسبّب في إطلاق أيّ انبعاثات ضارة.

- الطاقة الكهرومائية (أو الطاقة الكهرومائية) ((or hydroelectric power) Hydropower): أكبر مصدر في العالم للكهرباء المتجدّدة، يستخدم تدفّق المياه إلى أسفل المنحدرات لتشغيل التوربينات وتوليد الكهرباء. غالبًا ما يمكن لمحطات الطاقة الكهرومائية أن تغيّر إنتاجها من الطاقة؛ على سبيل المثال إذا كان السد ينظم مستوى الخزان. بالإضافة إلى ذلك، يمكن لتخزين الطاقة المائية التي يتمّ ضخها تخزين الطاقة الكهربائية الزائدة عن طريق ضخّ المياه صعودًا من الخزان السفلي إلى الخزان الأعلى، ثم تشغيل التوربينات في وقت لاحق عندما تكون هناك حاجة إلى الكهرباء.

- القصور الذاتي (Inertia): خاصّية لمولدات الطاقة التقليدية المتصلة بشبكة الكهرباء والتي تساعد على الموثوقية من خلال مقاومة التغييرات في تردد تشغيل الشبكة. نظرًا إلى أنّ المولدات المتزامنة التقليدية تحتوي على كتل كبيرة تدور على التردد نفسه، فإنّ عدم التوازن بين العرض والطلب الكهربائي للشبكة الذي يرفع تردد تشغيل الشبكة أو يخفضه تتم مواجهته بجمود النظام، مما يتيح لمشغلي الشبكة الوقت لإصلاح عدم التوازن. بعض المولدات، مثل الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV)، لا تسهم في القصور الذاتي (على الرغم من أنه يمكن برمجة المحوّلات لمحاكاتها، من خلال القصور الذاتي التركيبي).

- الصمام الثنائي الباعث للضوء ((LED) Light-emitting diode): تقنية إضاءة أكثر كفاءة من المصابيح المتوهجة التقليدية. مثل الخلايا الشمسية الكهروضوئية (PV)، تصنع مصابيح ليد من أشباه الموصلات. انخفضت تكلفة مصابيح ليد بعشرة أضعاف بين عامي 2009 و2015.

- الشبكات المصغّرة (Microgrid): شبكة صغيرة من المعدات المترابطة لتوليد الطاقة الكهربائية واستخدامها. عادة، تمتلك الشبكات الصغيرة القدرة على توليد أقلّ من 15 ميغاواط من الطاقة، وغالبًا ما تكون متصلة بالشبكة الرئيسة، ولكنها يمكن أن تكون أيضًا أنظمة قائمة بذاتها خارج الشبكة؛ على سبيل المثال في المناطق الريفية. يمكن لبعض الشبكات الصغيرة المتصلة بالشبكة أن تستمر في العمل بوصفها جزرًا مستقلة حتى عندما يكون هناك تعتيم على الشبكة الرئيسة.

- معيار المحفظة المتجدّدة ((RPS) Renewable portfolio standard): لائحة تتطلب من الشركات التي تزوّد العملاء بالكهرباء لإنتاج أو شراء جزء محدّد من الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة؛ على سبيل المثال، من معايير المحفظة المتجدّدة في كاليفورنيا أنه بحلول عام 2030م، سيشتري تجار التجزئة والمرافق العامة نصف الكهرباء من مصادر الطاقة المتجدّدة المؤهلة، والتي

تشمل الطاقة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية والكتلة الحيوية ومنشآت الطاقة الكهرومائية الصغيرة، ولكنها تستبعد أيضًا مرافق الطاقة الكهرومائية الكبيرة. كمصادر خالية من الكربون مثل الطاقة النووية.

- الشبكة الذكية (Smart grid): شبكة كهرباء مجهّزة بتقنيات رقمية تتيح الاتصال ثنائي الاتجاه بين المرافق وعملائها، وأجهزة الاستشعار، ومكوّنات شبكة النقل والتوزيع سريعة الاستجابة، والبرمجيات والبروتوكولات القادرة على إدارة الشبكة ديناميكيًّا.

- عداد ذكي (Smart meter): جهاز إلكتروني يسجّل استهلاك العميل للكهرباء على فترات زمنية مدّتها ساعة واحدة أو أقل، وينقل هذه المعلومات إلى المرافق للمراقبة والفواتير.

- المحطة الفرعية (Substation): مجموعة من المعدات الكهربائية التي تُحوّل جهد الكهرباء. تعدّ الفولتية العالية هي الأفضل للنقل لمسافات طويلة، في حين أنّ الفولتية المنخفضة هي الأفضل للاستخدام الآمن للكهرباء. يمكن للمحطات الفرعية رفع الجهد لإرسال الطاقة من المولد على طول خط النقل، أو توصيل خطوط نقل متعدّدة، أو تقليل الجهد لنقل الطاقة بين نظام النقل والتوزيع.

- النقل (Transmission): الحركة السائبة للكهرباء عند الفولتية العالية على مسافات طويلة تبدأ من مولدات الطاقة، وتنتهي في المحطات الكهربائية الفرعية التي تقلّل من جهد الكهرباء لنقلها إلى نظام التوزيع.

- مرافق الطاقة (Utility): في صناعة الطاقة الكهربائية، توفّر المرافق الكهربائية الطاقة الكهربائية ليستخدمها الجمهور في المقام الأول. يمكن أن تكون المرافق مملوكة ملكية عامة أو خاصّة. في أجزاء كثيرة من الولايات المتحدة تُعرف بالأسواق المنظمة، تضمن المرافق احتكار منطقة خدمة محدّدة لتوليد الكهرباء ونقلها وتوزيعها وبيعها للعملاء، ويشرف المنظمون الحكوميون على أسعار العملاء. وفي أماكن أخرى، تمتلك المرافق المنظمة شبكة النقل والتوزيع فقط، بينما تولد الشركات الخاصة الكهرباء لبيعها للمرافق، وفي بعض الحالات، بالتجزئة للعملاء. غالبًا ما تكون مثل هذه الشركات الخاصة أذرعًا غير منظمة لشركات تمتلك أيضًا مرافق منظمة.

- سوق الكهرباء بالجملة (Wholesale electricity market): سوق لمولدات الكهرباء المتنافسة لبيع إنتاجها لتجار التجزئة الذين يبيعونها بعد ذلك للعملاء. في الولايات المتحدة، غالبًا ما تمتدّ أسواق الكهرباء بالجملة في ولايات متعدّدة، وتتبع عملية المزاد التي يتمّ فيها قبول عروض بيع الكهرباء بترتيب تصاعدي حتى يتم تلبية الطلب على الكهرباء بالكامل، ويحدّد أعلى عرض مقبول سعر مقاصة السوق.

- طاقة الرياح (Wind power): شكل من أشكال الطاقة المتجدّدة التي تستخدم تدفّق الهواء عبر توربينات الرياح لإنتاج الكهرباء. مثل الطاقة الشمسية، تكون طاقة الرياح متقطعة، وتعتمد على

سرعات الرياح. يمكن وضع توربينات الرياح على الأرض أو في البحر؛ أصبحت توربينات الرياح البحرية اقتصادية بشكل متزايد.

مصطلحات الأعمال والتمويل

- الأوراق المالية المدعومة (Asset-backed security): أصل مالي قابل للتداول به تدفّقات دخل مشتقة من مجموعة من الأصول الأساسية.

- رأس مال (Capital): الثروة على شكل أموال أو أصول أخرى؛ يوفر المستثمرون رأس المال السهمي لتمويل مشروع تجاري مقابل الحصول على حصّة ملكية في هذا المشروع. يتم توفير رأس مال الديون من قبل المستثمرين مع توقع سدادهم مع الفائدة.

- تكلفة رأس المال (Cost of capital): معدّل العائد الذي يطلبه المستثمرون الذين يقدّمون الدين و / أو رأس المال السهمي لمشروع تجاري؛ سيتطلب مشروع الطاقة الشمسية رأس مال أكثر تكلفة إذا كان يُنظر إليه على أنه استثمار محفوف بالمخاطر.

- وفورات الحجم (Economies of scale): مزايا التكلفة التي تم الحصول عليها نتيجة لزيادة حجم العمليات التجارية؛ على سبيل المثال، من خلال زيادة إنتاج الألواح الشمسية، يمكن للمصنع توزيع تكاليفه الثابتة على المزيد من الوحدات، ومن ثم تقليل التكلفة لكل لوح شمسي. تنطبق وفورات الحجم أيضًا على النشر النهائي لمشاريع الطاقة الشمسية؛ يمكن لمشروع أكبر للطاقة الشمسية أن يوزّع التكاليف العامة على سعة أكبر لتوليد الطاقة، مما يقلّل التكلفة لكل واط في المشروع.

- السندات الخضراء (أو السندات المناخية) (Green bond (or climate bond: أداة مالية للدخل الثابت تشمل أصولًا، مثل مشاريع الطاقة المتجددة، والتي تساعد على تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري أو التكيف مع تغير المناخ.

- مستثمر مؤسسي (Institutional investor): كيان يجمع الأموال لشراء الأصول، حيث يشمل المستثمرون المؤسسيون: البنوك وشركات التأمين وصناديق التقاعد وصناديق التحوط وصناديق الثروة السيادية والأوقاف. بشكل جماعي، يديرون أكثر من 100 تريليون دولار، وسيكونون مهمّين لتوسيع نطاق الطاقة الشمسية.

- عقد الإيجار (Lease): ترتيب تعاقدي يدفع فيه المستخدم لمالك الأصل مقابل استخدامه. في الولايات المتحدة، قامت شركات مثل صن سيتي (التي أصبحت الآن جزءًا من تسلا) بتسويق عقود إيجار الطاقة الشمسية لدفع النمو في سوق الألواح الشمسية الموجودة على الأسطح، والتي يمكن

لمالكي المنازل من خلالها شراء الطاقة على أساس مستمر بدلًا من دفع التكلفة المرتفعة مسبقًا للنظام الشمسي.

- الشراكة المحدودة الرئيسة (Master limited partnership (MLP)): كيان متداول عام يضم مجموعة من الأصول المدرّة للدخل. للتأهل للإعفاء من ضرائب الشركات، يجب أن يأتي 90 بالمئة من دخل MLP من مصادر مؤهلة، والتي تشمل أنشطة مثل إنتاج ونقل الموارد الطبيعية المستنفدة. تمتلك معظم شركات الشراكات المحدودة الرئيسة خطوط أنابيب الوقود الأحفوري والأصول المماثلة وتشغلها.

- صندوق الاستثمار العقاري (Real estate investment trust (REIT)): الشركة التي تمتلك عقارات مدرّة للدخل يمكن طرحها للتداول العام، ولا تخضع لضرائب الشركات طالما أنها توزع 95 بالمئة من دخلها على المساهمين.

- التوريق (Securitization): الممارسة المالية لتجميع أنواع مختلفة من الديون، مثل الرهون العقارية السكنية، أو قروض السيارات، أو ديون بطاقات الائتمان، وبيع التدفقات النقدية للمحفظة كأوراق مالية قابلة للتداول إلى مستثمرين من أطراف ثالثة. يُعدّ التوريق وسيلة شائعة بشكل متزايد لزيادة رأس مال الديون لمشاريع الطاقة الشمسية الموزّعة.

- رأس المال الاستثماري (Venture capital (VC)): شكل من أشكال التمويل تقدّمه الشركات أو الصناديق للشركات الصغيرة مقابل حصّة ملكية، وتستند هذه الاستثمارات إلى تصوّر أنّ المشاريع يمكن أن تنمو بشكل كبير من حيث القيمة، غالبًا من خلال تطوير تقنيات ومنتجات جديدة.

مصطلحات الابتكار

- ابتكار (Business model innovation): نموذج الأعمال مقدّمة لعروض المنتجات أو نماذج الإيرادات أو الممارسات التشغيلية الجديدة في قطاع معين.

- تجريبي (Demonstration): أول استخدام للتقنية على نطاق واسع وفي ظروف العالم الحقيقي؛ بهدف إظهار جدوى التقنية وإمكاناتها التجارية. من المرجح أن تتطلب تقنيات الطاقة الجديدة مظاهرات ناجحة لإقناع المستثمرين من القطاع الخاص بنقلها إلى السوق. يتبع العرض التوضيحي عادةً البحث والتطوير، ويتطلب نطاقًا أكبر من التمويل؛ إدراكًا بأن العرض يمثل جانبًا مهمًا من عملية تطوير التقنية، فإن إستراتيجية وزارة الطاقة الأمريكية لابتكار الطاقة تتضمن تعزيز البحث والتطوير والتجارب.

- منحنى التجربة (Experience curve): رسم توضيحي للمبدأ الصناعي القائل بأنّ زيادة إنتاج منتج أو تقديم خدمة تؤدّي إلى انخفاض تكاليف الوحدة للمنتج أو الخدمة. توجد هذه العلاقة لعدة أسباب، بما في ذلك التعلم - تحسين كفاءة الإنتاج والتكلفة المصاحبة للأداء المتكرّر للمهام - وكذلك وفورات الحجم.

- الابتكار المالي (Financial innovation): تعميم الأدوات المالية أو المؤسسات أو الأسواق الجديدة في قطاع معين.

- الابتكار (Innovation): إدخال شيء ما تم تبنيه في سياق العالم الحقيقي لأول مرة. (بدلًا من ذلك، يمكن أن يشير الابتكار إلى التقنية، ونموذج الأعمال، وما إلى ذلك، التي تمّ تقديمها واعتمادها.)

- التقيد بخيارات تقنية (technological (in-Lock): شكل من أشكال الاعتماد على المسار الاقتصادي لا يستطيع فيه الجيل التقني القادم أن يحلّ محلّ الجيل الحالي. يمكن أن يحدث التقييد التقني إذا حصلت التقنية الحالية على ميزة ضد التقنية الناشئة؛ حتى لو كان بإمكان الشركات الناشئة أن تكون أقلّ تكلفة، وأن تؤدي بشكل أفضل عند المزيد من التطوير وحجم الإنتاج، فقد تتعثّر في سوق حرة تفضل المحرّكين الأوائل. وهناك حالة موثقة جيدًا للقيود، وهي الهيمنة العالمية لمفاعلات الماء الخفيف النووية على التصميمات البديلة؛ بالإضافة إلى ذلك، فإنّ الهيمنة الحالية لألواح الفولتية الضوئية الشمسية المصنوعة من السيليكون قد تمنع في المستقبل التعاقب التقني.

- البحث والتطوير (D&R) Research and development)): المرحلة الأولى من تطوير خدمة أو منتج جديد محتمل، يشمل البحث العلمي وتطوير التقنية التطبيقية، غالبًا بهدف حل مشكلة العالم الحقيقي. تشارك الشركات والمؤسسات غير الربحية والحكومات في البحث والتطوير، وتتوقّع النظرية الاقتصادية أنّ القطاع الخاص ليس لديه حوافز كافية للاستثمار في المستوى الاجتماعي الأمثل للبحث والتطوير، بوجه عام وعلى وجه التحديد لتقنيات الطاقة الجديدة.

- الابتكار المنهجي (Systemic innovation): تنفيذ مناهج جديدة لتصميم نظام معين، يشتمل نظام الطاقة على البنية التحتية المادية (مثل شبكة الطاقة)، والأسواق الاقتصادية (مثل أسواق الطاقة بالجملة)، والسياسات العامة (مثل اللوائح التي تحكم مرافق الطاقة).

- الابتكار التقني (Technological innovation): منتج أو عملية تقنية تم تسويقها أو طرحها في السوق لأول مرة. حتى إذا لم تخترع الشركة تقنية ما، فيمكنها أن تبتكر من خلال إدخال تلك التقنية بنجاح في السوق.

المنظمات

- وكالة مشاريع الأبحاث المتقدّمة للطاقة Advanced Research Projects Agency-Energy (E-ARPA): وكالة حكومية أمريكية، مقرها وزارة الطاقة، مكلفة بتعزيز وتمويل البحث والتطوير لتقنيات الطاقة المتقدمة؛ تم تصميمها على غرار وكالة مشاريع البحوث الدفاعية المتقدمة (DARPA).

- وزارة الطاقة Department of Energy (DOE): وزارة فدرالية أمريكية تشرف على الطاقة والأسلحة النووية والتخلص من النفايات المشعة. ترعى وزارة الطاقة (DOE) بحثًا كبيرًا، وتطويرًا، وعرضًا لتقنيات الطاقة الشمسية، لا سيما من خلال برنامج SunShot الخاص بها.

- مشغل الشبكة المستقلة في كاليفورنيا California Independent System Operator (CAISO): كيان مستقل غير ربحي يشرف على تشغيل شبكة نقل الطاقة الكهربائية في كاليفورنيا وسوق الكهرباء بالجملة.

- جرين بانك Green bank: مؤسسة مالية، مدعومة عادةً من قبل حكومة محلية أو وطنية، تستخدم تقنيات تمويل مبتكرة لتحفيز الاستثمار الخاص في تقنيات الطاقة النظيفة. في الولايات المتحدة، أسّست ولايتا كونيتيكت ونيويورك أول بنوك خضراء.

- الوكالة الدولية للطاقة International Energy Agency (IEA): منظمة حكومية دولية، تضم تسعًا وعشرين دولة عضوة في العالم المتقدّم، تعمل على تعزيز أمن الطاقة والتنمية الاقتصادية وحماية البيئة وتنشر الأبحاث حول أسواق وتقنيات الطاقة.

- الوكالة الدولية للطاقة المتجدّدة International Renewable Energy Agency (IRENA): منظمة حكومية دولية تروّج لتبني الطاقة المتجدّدة واستخدامها المستدام.

- المركز المشترك للتمثيل الضوئي الاصطناعي Joint Center for Artificial Photosynthesis: (JCAP) مركز ابتكار لوزارة الطاقة الأمريكية، مع مركزين رئيسين في معهد كاليفورنيا للتقنية، ومختبر لورانس بيركلي الوطني، وتتمثّل مهمّته الأساسية في إيجاد طريقة فعاّلة من حيث التكلفة لإنتاج الوقود باستخدام ضوء الشمس والماء وثاني أكسيد الكربون فقط.

- بنك التنمية متعدد الأطراف Multilateral development bank (MDB): مؤسّسة أنشأتها مجموعة من البلدان التي تقدّم التمويل والمشورة المهنية لتعزيز التنمية الاقتصادية؛ ومن الأمثلة على ذلك البنك الدولي، وبنك التنمية للبلدان الأمريكية، وبنك التنمية الآسيوي.

(*) يشير قانون مور إلى تصور غوردون مور، Gordon E. Moore، المؤسس المشارك لشركة إنتيل Intel، إلى أن عدد الترانزستورات أو المكونات في الرقاقة يتضاعف كل عامين، على الرغم من أن تكلفة أجهزة الكمبيوتر تنخفض إلى النصف. وقد تحوّل ما قاله إلى قانون يقول إنه يمكننا أن نتوقع أن تزيد سرعة حواسيبنا وقدرتها كل عامين، وسوف ندفع لها أسعارًا أقل. لكن ما قاله مجرد ملاحظة وليس قانونًا مثبتًا بالتجربة العلمية. المراجع.

(**) في أول أيام حكمه، وفّى الرئيس السابق دونالد ترامب بوعده الانتخابي في يناير/كانون الثاني 2017، وانسحبت بلاده من الاتفاق لتصبح الدولة الوحيدة التي انسحبت من المعاهدة حتى الآن.

وفي أول يوم له رئيسًا في يناير 2021، بدأ جو بايدن رسميًا العودة والانضمام إلى "اتفاق باريس للمناخ". المراجع.

(***) ويسمى أيضًا في الاعمال التجارية (منحنى سيغموند للنمو) Sigmund Growth Curve. وهو أداة يقياس التقدم وتقييم الأداء ورسم توقعات للتدفق النقدي في مدة زمنية محددة بناءَ على تراكمات البيانات لمشروع، أو شركة أو منتج ما.

(****) Supermajors أو Big Oil وصف لأكبر ست أو سبع شركات نفط وغاز متداولة في العالم. يؤكد المصطلح القوتهمة الاقتصادية والتأثير السياسي لهذه الشركات، لا سيما في الولايات المتحدة. كان هذه الشركات العملاقة تسمّى "الأخوات السبع" وهي (BP, Chevron, Eni, ExxonMobil, Royal Dutch Shell, Total, ConocoPhillips) وكانت تهيمن على إنتاج الشرق الأوسط من النفط. لكن إنشاء منظمة الأوبك حد من هذا الاحتكار، وتفرقت هذه "الأخوات" بحلول عام 2017 ولم يبق منها سوى أربعة هي: (BP, Chevron, ExxonMobil, Royal Dutch Shell).

(*****) شركة العائد المشترك أو عائد الأصول الخضراء YieldCo.

شركات ناشئة يتم تشكيلها، وبخاصة في مجال الطاقة المتجددة، لإدارة الأصول التشغيلية التي تنتج تدفقات نقدية يمكن التنبؤ بها ، ولحماية المستثمرين من التغييرات التنظيمية. وتدفع نسبة كبيرة من أرباحها في توزيعات الأرباح، التي قد تكون مصدرًا قيمًا لتمويل للشركة الأم التي تمتلك حصة كبيرة فيها.

(******) كشفت تحقيقات المفتش العام الأمريكي أن شركة سوليندرا Solyndra حصلت على قرض بمبلغ 535 مليون دولار بعدما قدمت معلومات مضللة لوزارة الطاقة. كانت الشركة الناشئة في مجال الطاقة الشمسية قد جمعت بليون دولار من مستثمرين خاصّين وخسرت 500 مليونًا من

قيمة القرض بعدما أعلنت إفلاسها في عام 2015. وتنص اتفاقية القرض على إعادة الوزارة لقيمة القرض إذا لم يتمكن المقترض من ذلك.

(*******) Negawatt مصطلح اشتقه آموري لوفنز Lovins Amory، كبير الباحثين في معهد جبل روكيRocky Mountain Institute، بولاية كولورادو، المعني بشؤون الطاقة والاستدامة. ويمثل المصطلح واط من الكهرباء لم يستخدم في أثناء عملية تقنين الطاقة ، أو يوفّر باستخدام وسائل توفير الطاقة.

(********) اسم لفيلم ياباني مأخوذ عن رواية بنفس الاسم للكاتب كوشون تاكامي. عرض الفيلم في العام 2000. تدور أحداث الفيلم في المستقبل في اليابان. بحسب الفيلم، تختطف الحكومة اليابانية 42 طالبًا في الصف التاسع، وتضعهم في جزيرة نائية وتجبرهم بالقانون على قتل بعضهم بعضًا بحيث لا يبقى منهم إلا طالب واحد على قيد الحياة. الرواية والفيلم واجها معارضة شديدة من نواب في البرلمان لكنهم فشلوا في حظرهما.

المراجع

Preface

1. Mayor Antonio R. Villaraigosa, Varun Sivaram, and Ron Nichols, "Powering Los Angeles with renewable energy," *Nature Climate Change* 3 (2013).

2. Lucas Mearian, "Data Storage Goes from $1M to 2 Cents per Gigabyte." *Computerworld*. April 10, 2017, http://core0.staticworld.net/assets/2017/04/10/cw-50th-anniversary-storage-trends.pdf.

Chapter 1

1. Tom Randall, "World Energy Hits a Turning Point: Solar That's Cheaper Than Wind," *Bloomberg*, December 14, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-12-15/world-energy-hits-a-turning-point-solar-that-s-cheaper-than-wind.

2. For an accessible discussion of the challenges that India's aging grid infrastructure poses to the continued rise of solar power, see Urmi Goswami, "Realizing India's Renewable Ambition," *The Economic Times*, July 2, 2016, http://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/power/realising-indias-renewable-ambition/articleshow/53016854.cms.

3. Myriam Alexander-Kearns et al., "The Impact of Vehicle Automation of Carbon Emissions," Center for American Progress, November 18, 2016, https://www.americanprogress.org/issues/green/reports/2016/11/18/292588/the-impact-of-vehicle-automation-on-carbon-emissions-where-uncertainty-lies.

4. "The Emissions Gap Report 2016: A UNEP Synthesis Report," United Nations Environment Programme, 2016, http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10016/emission_gap_report_2016.pdf.

5. For an overview of the projected impacts of climate change, see Working Group II, "Fifth Assessment Report. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and

Vulnerability," United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2.

6. David Wallace-Wells, "The Uninhabitable Earth," *New York Magazine*, July 9, 2017, http://nymag.com/daily/intelligencer/2017/07/climate-change-earth-too-hot-for-humans.html.

7. Peter U. Clark et al., "Consequences of Twenty-First-Century Policy for Multi-Millennial Climate and Sea-Level Change," *Nature Climate Change* 6 (February 8, 2016), http://www.nature.com/nclimate/journal/v6/n4/abs/nclimate2923.html.

8. "Climate Change and Migration Issues in the Pacific," United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2015, http://www.ilo.org/dyn/migpractice/docs/261/Pacific.pdf.

9. Varun Sivaram et al., "Energy Innovation Policy: Priorities for the Trump Administration and Congress," Information Technology and Innovation Foundation, December 2016, http://www2.itif.org/2016-energy-innovation-policy.pdf?_ga=2.100848641.127748496.1496762242-636560486.1494874808.

10. Bradley E. Layton, "A Comparison of Energy Densities of Prevalent Energy Sources in Units of Joules per Cubic Meter," *International Journal of Green Energy* 6 (2006), http://www.usclcorp.com/news/energy-docs/A%20Comparison%20of%20Energy%20Densities.pdf.

11. "Tracking Clean Energy Progress 2017," International Energy Agency (IEA), 2017, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf.

12. Samuel D. Stranks and Henry J. Snaith, "Perovskite Solar Cells," in *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*, ed. Angèle Reinders, Pierre Verlinden, Wilfried van Sark, and Alexandre Freundlich (John Wiley & Sons, 2017), 277–289.

13. Joshua Christian and Clifford Ho, "Design Requirements, Challenges, and Solutions for High-Temperature Falling Particle Receivers," Albuquerque: Concentrating Solar Technologies Department, Sandia National Lab (2016): doi:10.1063/1.4949060.

14. Katherine Bourzac, "News Feature: Liquid Sunlight," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, no. 17 (2016): 4545–4548, doi:10.1073/pnas.1604811113.

15. Bill Gates, "Energy Innovation: Why We Need It and How to Get It," *Gates Notes*, November 30, 2015, https://www.gatesnotes.com/~/media/Files/Energy/Energy_Innovation_Nov_30_2015.pdf.

16. Madhvi Sally and Shreya Jai, "Agri Companies Now Prefer Solar Powered Products in Rural India," *The Economic Times*, December 25, 2013, http://articles.economictimes.indiatimes.com/2013-12-25/news/45561591_1_mahindra-partners-karan-dangayach-shashwat-green-fuels.

17. M. Soundariya Preetha, "Textile Mills Go in for Solar Energy Projects," *Hindu*, May 25, 2014, http://www.thehindu.com/news/cities/Coimbatore/textile-mills-go-in-for-solar-energy-projects/article6045981.ece.

18. Anindya Upadhyay, "Softbank Eyes Indian Solar Manufacturing in Boost to Modi's Goal," *Bloomberg*, September 19, 2016, http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-09-20/softbank-eyes-indian-solar-manufacturing-in-boost-to-modi-s-goal.

19. "Renewables 2016: Global Status Report," Renewable Energy Network for the 21st Century, 2016, 65, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf.

20. Varun Sivaram, Gireesh Shrimali, and Dan Reicher, "Reach for the Sun: How India's Audacious Solar Ambitions Could Make or Break Its Climate Commitments," Stanford Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, December 8, 2015, https://law.stanford.edu/reach-for-the-sun-how-indias-audacious-solar-ambitions-could-make-or-break-its-climate-commitments.

21. Varun Sivaram, "Can India Save the Warming Planet?" *Scientific American* (May 2017), https://www.scientificamerican.com/article/can-india-save-the-warming-planet.

22. "Financing India's Energy Transition," Bloomberg New Energy Finance, November 1, 2016, https://about.bnef.com/blog/financing-indias-clean-energy-transition.

23. Rajesh Kumar Singh and Saket Sundria, "Living in the Dark: 240 Million Indians Have No Electricity," *Bloomberg*, January 24, 2017, https://www.bloomberg.com/news/features/2017-01-24/living-in-the-dark-240-million-indians-have-no-electricity.

24. Rajesh Kumar Singh and Anindya Upadhyay, "Modi's Plan to Clean up World's Worst Air Resisted by Indian Power Generators," *Bloomberg*, March 30, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-30/modi-s-picnic-spot-plan-resisted-by-indian-power-generators.

25. Charles K. Ebinger, "India's Energy and Climate Policy: Can India Meet the Challenge of Industrialization and Climate Change?" The Brookings Institution, June 2016, https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/07/india_energy_climate_policy_ebinger.pdf.

26. Vlado Vivoda, *Energy Security in Japan: Challenges After Fukushima* (New York: Routledge, 2016), 36–37.

27. Toko Sekiguchi, "Returning Home: Japan Nuclear Disaster Forced Thousands to Flee; Many Are Now Divided over Whether to Come Back," *Wall Street Journal*, October 23, 2014, http://www.wsj.com/articles/fukushima-refugees-wary-of-returning-home-1414099802.

28. "Japan's Strategic Energy Plan," Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan, 2012, http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/Japan's%20 Strategic%20Energy%20Plan_vF.pdf.

29. "Japan Nuclear Update," Nuclear Energy Institute, April 20, 2017, http://www .nei.org/News-Media/News/Japan-Nuclear-Update.

30. Jason Deign, "Subsidy Cuts Will Cause a 'Sharp Negative Turn' in Japan's Solar Market Through 2020," Greentech Media, June 1, 2016, http://www.greentechmedia .com/articles/read/japan-plans-to-curb-solar-growth.

31. Tim Buckley and Simon Nicholas, "Japan: Greater Energy Security Through Renewables," Institute for Energy Economics and Financial Analysis, March 2017, http://ieefa.org/wp-content/uploads/2017/03/Japan_-Greater-Energy-Security -Through-Renewables-_March-2017.pdf.

32. Aaron Sheldrick, "Japan to Cut Emphasis on Nuclear in Next Energy Plan: Sources," *Reuters*, May 26, 2016, http://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear -idUSKCN0YI06Z.

33. Mike Stone, "Japanese Utilities Invest in Big Batteries to Help Bring More Renewables On-Line," Greentech Media, May 19, 2015, http://www.greentechmedia.com /articles/read/japanese-utilities-invest-in-big-batteries.

34. "The Photovoltaic Power Systems Programme Annual Report 2015," International Energy Agency (IEA), August 2016, http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6.

35. Jessica Belt, "How Will Latin America Deal with Its Hydropower Problem," *GreenBiz*, May 20, 2015, https://www.greenbiz.com/article/how-will-latin-america-deal-its -hydropower-problem.

36. Sushma Udipi Nagendran, "4 Charts Explaining Latin America's Impending Solar Boom," Greentech Media, March 10, 2017, https://www.greentechmedia.com /articles/read/explaining-latin-americas-impending-solar-boom1.

37. Vanessa Dezem and Javiera Quiroga, "Chile Has So Much Solar Energy It's Giving It Away for Free," *Bloomberg*, June 1, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles /2016-06-01/chile-has-so-much-solar-energy-it-s-giving-it-away-for-free.

38. Wael Mahdi and Vivian Nereim, "Saudis Target 30 Solar, Wind Projects in $50 Billion Pledge," *Bloomberg*, April 17, 2017, https://www.bloomberg.com/news/articles /2017-04-17/saudis-seek-30-solar-wind-projects-in-50-billion-pledge.

39. Glada Lahn and Paul Stevens, "Burning Oil to Keep Cool: The Hidden Energy Crisis in Saudi Arabia," December 2011, https://www.chathamhouse.org/sites/files/chatham house/public/Research/Energy,%20Environment%20and%20Development/1211pr _lahn_stevens.pdf.

40. Thomas Wellock, "'Too Cheap to Meter:' A History of the Phrase," U.S. Nuclear Regulatory Commission, June 3, 2016, https://public-blog.nrc-gateway.gov/2016/06/03/too-cheap-to-meter-a-history-of-the-phrase.

41. Derek Gill, "I Only Wish I Could Have Been Born Into the Age My Six Children Will See," *Chicago Tribune*, June 22, 1969, http://archives.chicagotribune.com/1969/06/22/page/256/article/i-only-wish-i-could-have-been-born-into-the-age-my-six-children-will-see.

42. Varun Sivaram, "Unlocking Energy," *Issues in Science and Technology* 33, no. 2 (Winter 2017), http://issues.org/33-2/unlocking-clean-energy.

43. Angus McCrone et al., "Global Trends in Renewable Energy Investment," Frankfurt School-United Nations Environment Programme Collaborating Centre for Climate and Sustainable Energy Finance, 2016, http://fs-unep-centre.org/publications/global-trends-renewable-energy-investment-2016.

44. Nancy M. Haegel et al., "Terrawatt-Scale Photovoltaics: Trajectories and Challenges," *Science*, April 14, 2017, http://science.sciencemag.org/content/356/6334/141.

45. Vaclav Smil. *Energy and Civilization: A History* (Cambridge, MA: MIT Press, 2017).

46. "Climate Change 2014 Synthesis Report: Summary for Policymakers," Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf.

47. Benjamin K. Sovacool, "How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions," *Energy Research & Social Science* 13 (March 2016), http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629615300827.

48. Jessica F. Green, "Don't Link Carbon Markets," *Nature* 543, no. 7646, (March 21, 2017), http://www.nature.com/news/don-t-link-carbon-markets-1.21663.

Chapter 2

1. Kevin Bullis, "A Price Drop for Solar Panels," *MIT Technology Review*, October 22, 2012, https://www.technologyreview.com/s/410064/a-price-drop-for-solar-panels.

2. DealBook, "Nanosolar Raises $300 Million," *New York Times*, August 28, 2008, http://dealbook.nytimes.com/2008/08/28/nanosolar-announces-300-million-financing-round.

3. Christian Roselund, "BNEF: Global Solar Investment Fell 32% in 2016," *PV Magazine International*, January 12, 2017, https://www.pv-magazine.com/2017/01/12/bnef-global-solar-investment-fell-32-in-2016/.

4. John Perlin, *Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy* (Novato, CA: New World Library, 2013), 115–117.

5. Geoffrey Jones and Loubna Bouamane, "'Power from Sunshine': A Business History of Solar Energy," Harvard Business School Working Paper, May 2012, 9.

6. Perlin, *Let It Shine*, 115–117.

7. Travis Bradford, *Solar Revolution: The Economic Transformation of the Global Energy Industry* (Cambridge, MA: MIT Press, 2006), 98.

8. Werner Weiss and Franz Mauthner, *Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2010,* Gleisdorf, Austria: AEE–Institute for Sustainable Technologies, 2012, 12.

9. Perlin, *Let It Shine*, 362.

10. Catherine Wu, "Global CSP Installed Capacity Increased to 5017 MW by the End of 2016," CSP Plaza, January 17, 2017, http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-5017-mw-by-the-end-of-2016.html.

11. "Photovoltaic Milestone: 300 Gigawatts of Global Installed PV Capacity," German Solar Association, January 26, 2017, https://www.solarwirtschaft.de/en/media/single-view/news/photovoltaic-milestone-300-gigawatts-of-global-installed-pv-capacity.html.

12. Perlin, *Let It Shine*, 362.

13. Albert Einstein, "Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light," *Annals of Physics* 17, no. 132: 1905.

14. E. D. Wilson, "Power from the Sun," *Power* 28 (October 1935): 517.

15. Jon Gertner, *The Idea Factory* (New York: Penguin Press, 2012).

16. "Vast Power of the Sun Is Tapped by Battery Using Sand Ingredient," *The New York Times*, April 26, 1954, http://www.nytimes.com/packages/pdf/science/TOPICS_SOLAR_TIMELINE/solar1954.pdf.

17. Dwight D. Eisenhower, "Atoms for Peace," speech delivered at the 470th Plenary Meeting of the United Nations General Assembly, December 8, 1953, https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech.

18. Ubaid Asad, Zulfiqar, Sajid Riaz, and Muhammad Imran., "Role of Solar Energy in Atmospheric Pollution Reduction—A Review." *International Journal of Science, Engineering and Innovation Research* 1 (July 2015), 2.

19. Harvey Strum, "Eisenhower's Solar Energy Policy," *The Public Historian* 6, no. 2 (Spring 1984), 37–50.

20. National Research Council et al., *Solar Cells: Outlook for Improved Efficiency* (Washington, DC: The National Academies Press, 1972).

21. N. K. Thuan, "Telecommunications Power in Australia," presentation at the International Telecommunications Energy Conference, Washington, DC, 1982, 395–401.

22. B. McNelis, "The Photovoltaic Business: Manufacturers and Markets," in *Clean Electricity from Photovoltaics*, ed. Mary D. Archer and Robert Hill (London: Imperial College Press, 2001), 713–740.

23. Jones and Bouamane, "Power from Sunshine."

24. Jimmy Carter, "Solar Photovoltaic Energy Research, Development, and Demonstration Act of 1978 Statement on Signing H.R. 12874 into Law," The American Presidency Project, November 4, 1978, http://www.presidency.ucsb.edu/ws/?pid=30122.

25. "A Shakedown Shapes up in Photovoltaics," *Chemical Week*, February 3, 1982, 33.

26. Peter Z. Grossman, *U.S. Energy Policy and the Pursuit of Failure* (New York: Cambridge University Press, 2013).

27. John Abbots, "All the King's Horses and All the King's Men," *Bulletin of the Atomic Scientists* (January/February 1989), 49.

28. Bob Johnstone, *Switching to Solar* (New York: Prometheus Books, 2011), 129–130.

29. "Solar Energy Support in Germany: A Closer Look," Solar Energy Industries Association, July 2014.

30. Kristen Ardani, Robert Margolis, Galen Barbose, et al. "2010 Solar Market Trends Report," National Renewable Energy Laboratory (NREL), November 2011, xiii–1.

31. R. C. Chittick and H. F. Sterling, "Glow Discharge Disposition of Amorphous Semiconductors: The Early Years," in *Tetrahedrally-Bonded Amorphous Semiconductors*, ed. David A. Adler and Helmut Fritzsche (New York: Springer Science & Business Media, 1985), 6.

32. Matthew L. Wald, "Slicing Silicon Thinner to Cut the Price of Solar Cells," *New York Times*, March 13, 2017, https://green.blogs.nytimes.com/2012/03/13/slicing-silicon-thinner-to-cut-the-price-of-solar-cells.

33. Steven Mufson, "Chinese Tariffs May Hurt U.S. Makers of Solar Cells' Raw Material," *Washington Post*, July 23, 2013, https://www.washingtonpost.com/business/economy/chinese-tariffs-may-hurt-us-makers-of-solar-cells-raw-material/2013/07/23/01ac60a4-f3d9-11e2-aa2e-4088616498b4_story.html.

34. Tim Worstall, "Solyndra: Yes, It Was Possible to See This Failure Coming," *Forbes*, September 17, 2011, http://www.forbes.com/sites/timworstall/2011/09/17/solyndra-yes-it-was-possible-to-see-this-failure-coming.

35. Ashley Parker, "Romney Campaigns at Failed Solyndra Factory," *The New York Times*, May 21, 2012, http://thecaucus.blogs.nytimes.com/2012/05/31/romney-to-campaign-at-failed-solyndra-factory.

36. Benjamin Gaddy, Varun Sivaram, and Francis O'Sullivan, "Venture Capital and Cleantech: The Wrong Model for Clean Energy Innovation," July 2016, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/07/MITEI-WP-2016-06.pdf.

37. Kevin Desmond, *Innovators in Battery Technology Profiles of 95 Influential Electrochemists* (Jefferson, NC: McFarland & Company, Inc., 2016).

38. Martin A. Green, "Silicon Solar Cells: The Ultimate Photovoltaic Solution?" *Progress in Photovoltaics* 2, no. 2 (April 1994): 87–94.

39. Chetan Singh Solanki, "Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies, and Applications," New Delhi, India: Prentice-Hall of India, 2015.

40. Jianhua Zhao, Aihua Wang, and Martin A. Green, "24.5% Efficiency Silicon PERT Cells on MCZ Substrates and 24.7% Efficiency PERL Cells on FZ Substrates," *Progress in Photovoltaics* 7, no. 6 (1999): doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(199911/12)7:6<471::AID-PIP298>3.0.CO;2-7

41. Mohamed Bououdina and J. Paulo Davim, *Handbook of Research on Nanoscience, Nanotechnology, and Advanced Materials* (Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2014).

42. "International Technology Roadmap for Photovoltaics: Seventh Edition," 2016, http://www.itrpv.net/.cm4all/iproc.php/ITRPV%20Seventh%20Edition%20including%20maturity%20report%2020161026.pdf.

43. Martin Green, "Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years," *Progress in Photovoltaic Research and Applications*, August 2005, 449–451.

44. Yu Zhou, eds., *China as an Innovation Nation* (Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2016).

45. Ping Huang, Simona O. Negro, Marko P. Hekkert, and Kexin Bi, "How China became a Leader in Solar PV: An Innovation System Analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, (2016): 777-789.

46. Arnaud De La Tour, Matthieu Glachant, and Yann Ménière, "Innovation and International Technology Transfer: The Case of the Chinese Photovoltaic Industry," *Energy Policy* 39, no. 2 (2011): 761–770.

47. Gang Chen, "From Mercantile Strategy to Domestic Demand Stimulation: Changes in China's Solar PV Subsidies," *Asia Pacific Business Review* 21, no. 1, (2015): 96–112.

48. Usha C. V. Haley and George T. Haley, "How Chinese Subsidies Changed the World," *Harvard Business Review*, April 25, 2013, https://hbr.org/2013/04/how-chinese-subsidies-changed.

49. Nagalakshmi Puttaswamy and Mohd. Sahil Ali, "How Did China Become the Largest Solar PV Manufacturing Country?" Center for the Study of Science Technology and Policy, February 2015, 2. http://www.cstep.in/uploads/default/files/publications/stuff/CSTEP_Solar_PV_Working_Series_2015.pdf.

50. John Deutch and Edward Steinfeld, "A Duel in the Sun: The Solar Photovoltaics Technology Conflict Between China and the United States." MIT Future of Solar Energy Study Working Paper, 2013. https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2013/05/MITEI-WP-2013-01.pdf.

51. Xin-gang Zhao, Guan Wan, and Yahui Yang, "The Turning Point of Solar Photovoltaic Industry in China: Will It Come?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (January 2015): 178–188.

52. James Murray, "Spain Proposes Deep Cuts to Solar PV Support," *The Guardian*, August 3, 2010, https://www.theguardian.com/environment/2010/aug/03/spain-cuts-solar-pv.

53. Edgar Meza, "IRENA: PV Prices Have Declined 80% Since 2008," *PV Magazine: Photovolaic Markets & Technology*, September 11, 2014, http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/irena--pv-prices-have-declined-80-since-2008_100016383/.

54. Beata Śliż-Szkliniarz, *Energy Planning in Selected European Regions: Methods for Evaluating the Potential of Renewable Energy Sources* (Karlsruhe, Germany: Karlsruhe Institute for Technology Scientific Publishing, 2013), 17.

55. Yuanyuan Liu, "Developing Trends in China's Solar PV Industry for 2016," *Renewable Energy World*, March 10, 2016, http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/03/developing-trends-in-china-s-pv-industry-for-2016.html.

56. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and PSE AG, "Photovoltaics Report," November 17, 2016.

57. S. Blakewell, "Chinese Renewable Companies Slow to Tap $47 Billion Credit," *Bloomberg*, November 16, 2011, http://www.bloomberg.com/news/articles/2011-11-16/chinese-renewable-companies-slow-to-tap-47-billion-credit-line.

58. Keith Bradsher, "Suntech Unit Declares Bankruptcy," *The New York Times*, March 20, 2013, http://www.nytimes.com/2013/03/21/business/energy-environment/suntech-declares-bankruptcy-china-says.html.

59. Eric Wesoff and Stephen Lacey, "Solar Costs Are Hitting Jaw-Dropping Lows in Every Region of the World," *Greentech Media*, June 27, 2017, https://www

.greentechmedia.com/articles/read/solar-costs-are-hitting-jaw-dropping-lows-in-every-region-of-the-world.

60. Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 10.0," December 2016, https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf.

61. Dolf Gielen et al., "Letting in the Light," International Renewable Energy Agency, 2016, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Letting_in_the_Light_2016.pdf.

62. Goksin Kavlak, James McNerney, and Jessika Trancik, "Evaluating the Changing Causes of Photovoltaics Cost Reduction," Working Paper, 2017, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2891516.

63. Jones and Bouamane, "'Power from Sunshine'."

64. Renewable Energy Policy Network, "Renewables 2016: Global Status Report," http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf.

65. Institute for Energy Economics and Financial Analysis, "2016: Year in Review," http://ieefa.org/wp-content/uploads/2016/11/2016-Year-in-Review.pdf.

66. Stephen Lacey, "Jinko and Marubeni Bid 2.4 Cents to Supply Solar in Abu Dhabi. How Low Can Solar Prices Go?" *Greentech Media,* September 20, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/jinko-solar-and-marubeni-bid-2.4-cents-for-solar-power-plant-in-abu-dhabi.

67. Bloomberg New Energy Finance (BNEF), "New Energy Outlook 2017," June 2017, https://www.bloomberg.com/company/new-energy-outlook/.

68. "International Technology Roadmap for Photovoltaics."

69. Jeffrey Ball, Dan Reicher, Xiaojing Sun, and Caitlin Pollock, "The New Solar System: China's Evolving Solar Industry and Its Implications for Competitive Solar Power in the United States and the World," Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, March 20, 2017, https://www-cdn.law.stanford.edu/wp-content/uploads/2017/03/2017-03-20-Stanford-China-Report.pdf.

Chapter 3

1. Vera Eckert, "European Power Grids Keep Lights on Through Solar Eclipse," *Reuters*, March 20, 2015, http://www.reuters.com/article/us-solar-eclipse-germany-idUSKBN0MG0S620150321.

2. Alex Perera and Colin McCormick, "Solar Eclipse in Europe Shows Grid Operators Can Be Successful with Renewables," World Resources Institute (WRI), March 31, 2015, http://www.wri.org/blog/2015/03/solar-eclipse-europe-shows-grid-operators-can-be-successful-renewables.

3. Eric Marx, "How Solar-Heavy Europe Avoided a Blackout During Total Eclipse," *Scientific American*, March 24, 2015, https://www.scientificamerican.com/article/how-solar-heavy-europe-avoided-a-blackout-during-total-eclipse.

4. Kerstine Appune and Sven Egenter, "Energiewende Passes Solar Eclipse Stress Test," *Clean Energy Wire*, June 27, 2016, https://www.cleanenergywire.org/news/energiewende-passes-solar-eclipse-stress-test.

5. Stefan Nicola, Weixin Zha, and Lorenzo Totaro, "Solar Age's First Eclipse Passes with Brief Surge in Power Price," *Bloomberg*, March 20, 2015, https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-03-20/eclipse-tests-european-power-grid-flooded-by-solar-farms-i7hlfkm0.

6. Soren Amelang and Jakob Schelandt, "Germany's Electricity Grid Stable Amid Energy Transition," *Clean Energy Wire*, October 24, 2016, https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-electricity-grid-stable-amid-energy-transition.

7. Amy Gahran, "Germany's Course Correction on Solar Growth," *Greentech Media*, November 3, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/germanys-course-correction-on-solar-growth.

8. Fraunhofer ISE, "Recent Facts About Photovoltaics in Germany," Fraunhofer-Gesellschaft, 2017, https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf.

9. Carmine Gallo, "Tesla's Elon Musk Lights Up Social Media with a TED Style Keynote," *Forbes*, May 4, 2015, http://www.forbes.com/sites/carminegallo/2015/05/04/teslas-elon-musk-lights-up-social-media-with-a-ted-style-keynote.

10. "Short-Term Energy Outlook," U.S. Energy Information Administration (EIA), 2017, https://www.eia.gov/outlooks/steo/query.

11. Jesse D. Jenkins and Samuel Thernstrom, "Deep Decarbonization of the Electric Power Sector: Insights from Recent Literature," Energy Innovation Reform Project (EIRP), March 2017, http://innovationreform.org/wp-content/uploads/2017/03/EIRP-Deep-Decarb-Lit-Review-Jenkins-Thernstrom-March-2017.pdf.

12. "Energy Technology Perspectives 2016—Towards Sustainable Urban Energy Systems," International Energy Agency (IEA), June 1, 2016, http://www.iea.org/etp/.

13. Mark Z. Jacobson and Mark A. Delucchi, "Providing All Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials," *Energy Policy* 6, no. 3 (March 2011), doi: 10.1016/j.enpol.2010.11.040.

14. Peter J. Loftus et al., "A Critical Review of Global Decarbonization Scenarios: What Do They Tell Us About Feasibility?" *WIREs Climate Change* 6, no. 1 (November 5, 2014), doi: 10.1002/wcc.324.

15. Christopher T. M. Clack et al., "Evaluation of a Proposal for Reliable Low-Cost Grid Power with 100% Wind, Water, and Solar," *PNAS* 114, no. 26 (2017): 6722-6727, doi: 10.1073/pnas.1610381114.

16. International Energy Agency (IEA), "Energy Technology Perspectives 2017," 2017, http://www.iea.org/etp.

17. Diane Cardwell and Jonathan Soble, "Westinghouse Files for Bankruptcy, in Blow to Nuclear Power," *New York Times*, March 29, 2017, https://www.nytimes.com/2017/03/29/business/westinghouse-toshiba-nuclear-bankruptcy.html.

18. Ana Mileva, "Power System Balancing for Deep Decarbonization of the Electricity Sector," *Applied Energy* 162 (January 15, 2016): http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915014300.

19. Arnulf Grubler, "The Costs of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing." *Energy Policy* 38, no. 9 (September 2010): http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510003526

20. Patrick Moriarty and Damon Honnery, "Can Renewable Energy Power the Future?" *Energy Policy* 93 (June 2016): 3–7, doi:10.1016/j.enpol.2016.02.051.

21. Patrick Moriarty and Damon Honnery, "What Is the Global Potential for Renewable Energy?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 1 (January 2012): 244–52, doi:10.1016/j.rser.2011.07.151.

22. Nathan Lewis and Daniel Nocera, "Powering the Planet: Chemical Challenges in Solar Energy Utilization." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, no. 43 (October 24, 2006): 15729–15735, doi:10.1073/pnas.0603395103.

23. Ellen Thalman, "What German Households Pay for Power," *Clean Energy Wire*, December 21, 2016, https://www.cleanenergywire.org/factsheets/what-german-households-pay-power.

24. Michael Liebreich and Angus McCrone, "The Shift to 'Base-Cost' Renewables: 10 Predictions for 2017," *Bloomberg New Energy Finance*, January 19, 2017, https://about.bnef.com/blog/liebreich-shift-base-cost-renewables-10-predictions-2017/.https://about.bnef.com/blog/liebreich-shift-base-cost-renewables-10-predictions-2017/.

25. Christian Roselund, "BNEF: Global Solar Investment Fell 32% in 2016," *PV Magazine International*, January 12, 2017, https://www.pv-magazine.com/2017/01/12/bnef-global-solar-investment-fell-32-in-2016/.

26. Tom Randall, "World Energy Hits a Turning Point: Solar That's Cheaper Than Wind," *Bloomberg*, December 15, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-12-15/world-energy-hits-a-turning-point-solar-that-s-cheaper-than-wind.

27. Angus McCrone, "If Interest Rates Turn, Clean Energy Will Find It Tougher," *Bloomberg New Energy Finance*, January 27, 2017, https://about.bnef.com/blog/mccrone-interest-rates-turn-clean-energy-will-find-tougher/.

28. Ethan Zindler and Ken Locklin, "Mapping the Gap: The Road from Paris," *Bloomberg New Energy Finance*, January 27, 2017, https://www.ceres.org/resources/reports/mapping-the-gap-the-road-from-paris/.

29. Global Capital Finance, "The European Renewable Energy Investor Landscape," Clean Energy Pipeline, http://cleanenergypipeline.com/Resources/CE/ResearchReports/The%20European%20Renewable%20Energy%20Investor%20Landscape.pdf.

30. IRENA, "Financial Mechanisms and Investment Frameworks for Renewables in Developing Countries," IRENA, 2012, http://irena.org/Finance_RE_Developing_Countries.pdf.

31. Asian Development Bank (ADB), "ADB to Provide India $500 Million for Solar Rooftop Systems," 2016, https://www.adb.org/news/adb-provide-india-500-million-solar-rooftop-systems.

32. Vivek Sen, Kuldeep Sharma, and Gireesh Shrimali, "Reaching India's Renewable Energy Targets: The Role of Institutional Investors," Climate Policy Initiative (CPI), December 2016, https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2016/11/Reaching-Indias-Renewable-Energy-Targets-The-Role-of-Institutional-Investors.pdf.

33. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), "Progress Report on Approaches to Mobilising Institutional Investment For Green Infrastructure," September 2016, https://www.oecd.org/cgfi/resources/Progress_Report_on_Approaches_to_Mobilising_Institutional_Investment_for_Green_Infrastructure.pdf.

34. Mark Fulton and Reid Capalino, "Investing in the Clean Trillion: Closing the Clean Energy Investment Gap," Ceres, January 2014, https://www.ceres.org/resources/reports/investing-in-the-clean-trillion-closing-the-clean-energy-investment-gap.

35. Ilmi Granoff, J. Ryan Hogarth, and Alan Miller, "Nested Barriers to Low-Carbon Infrastructure Investment," *Nature Climate Change* 6, no. 12 (April 12, 2016): 1065–1071, doi:10.1038/nclimate3142.

36. Arijit Barman, "Abu Dhabi Sovereign Fund ADIA Eyes $200 Million Investment in Greenko," *The Economic Times*, May 25, 2016, http://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/power/abu-dhabi-sovereign-fund-adia-eyes-200-million-investment-in-greenko/articleshow/52441639.cms.

37. The White House, Office of the Press Secretary, "Fact Sheet: Obama Administration Announces More Than $4 Billion in Private-Sector Commitments and Executive Actions to Scale up Investment in Clean Energy Innovation," National Archives and Records Administration, press release, June 16, 2015. https://obamawhitehouse

.archives.gov/the-press-office/2015/06/16/fact-sheet-obama-administration-announces-more-4-billion-private-sector.

38. Nathaniel J. Williams, Paulina Jaramillo, Jay Taneja, and Taha Selim Ustun, "Enabling Private Sector Investment in Microgrid-Based Rural Electrification in Developing Countries: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015): 1268–281, doi:10.1016/j.rser.2015.07.153.

39. The White House. "Catalyzing Global Markets for Off-Grid Energy Access." (Washington DC: National Archives and Records Administration, 2016), https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/docs/catalyzing_global_markets_for_off-grid_energy_access_final_cover.pdf.

40. Robert O'Brien, "Copper Price Fall Bad News for Chile But Not Disaster," *Reuters*, January 15, 2015, http://www.reuters.com/article/chile-copper-economy-idUSL6N0UU4WA20150115.

41. "Oil & Gas Security: Emergency Response of IEA Countries: Chile," International Energy Agency (IEA), 2012, 25.

42. Simon Currie, "Renewable Energy in Latin America: Chile," Norton Rose Fulbright, October 2016, http://www.nortonrosefulbright.com/knowledge/publications/134773/renewable-energy-in-latin-america-chile.

43. Shahriyar Nasirov and Carlos Silva, "Diversification of Chilean Energy Matrix: Recent Developments and Challenges," International Association for Energy Economics (IAEE), 2014, https://www.iaee.org/en/publications/newsletterdl.aspx?id=256.

44. Matt Craze, "Chile's Water Shortage Threatens Wines and Mines," *Bloomberg*, March 10, 2015, http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-03-10/wines-to-mines-imperiled-as-chile-fights-california-like-drought/.

45. Ian Clover, "Chile: New 80-MW Merchant Solar Project Announced," *PV Magazine International*, January 12, 2015, https://www.pv-magazine.com/2015/01/12/chile-new-80-mw-merchant-solar-project-announced_100017736/.

46. Vanessa Dezem and Javiera Quiroga, "Chile Has So Much Solar Energy It's Giving It Away for Free," *Bloomberg*, June 01, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-06-01/chile-has-so-much-solar-energy-it-s-giving-it-away-for-free.

47. Vanessa Dezem, "Solar Sold in Chile at Lowest Ever, Half Price of Coal," *Bloomberg*, August 19, 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-19/solar-sells-in-chile-for-cheapest-ever-at-half-the-price-of-coal.

48. Bentham Paulos, "How Wind and Solar Will Blow up Power Markets," *Greentech Media*, August 11, 2015, https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-wind-and-solar-will-blow-up-power-markets.

49. Lion Hirth, "What Caused the Drop in European Electricity Prices?" USAEE Working Paper No. 16–282, November 23, 2016, https://ssrn.com/abstract=2874841

50. Soren Amelang and Julian Wettengal, "E.ON Shareholders Ratify Energy Giant's Split," Clean Energy Wire, June 9, 2016, https://www.cleanenergywire.org/factsheets/eon-shareholders-ratify-energy-giants-split.

51. Soren Amelang and Julian Wettengal, "RWE's Plans for New Renewable Subsidiary," Clean Energy Wire, June 5, 2016, https://www.cleanenergywire.org/factsheets/rwes-plans-new-renewable-subsidiary

52. Michael Kraus, "Almost a Reform: The New German Support Scheme for Renewable Electricity," Oxera, August 2014, http://www.oxera.com/Latest-Thinking/Agenda/2014/Almost-a-reform-the-new-German-support-scheme-for.aspx.

53. Varun Sivaram and Shayle Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," *Nature Energy* 1, no. 4 (April 7, 2016): doi:10.1038/nenergy.2016.36.

54. Stefano Clò and Gaetano D'adamo, "The Dark Side of the Sun: How Solar Power Production Affects the Market Value of Solar and Gas Sources," *Energy Economics* 49 (May 2015): 523–530, doi:10.1016/j.eneco.2015.03.025.

55. Ivan Penn, "California Invested Heavily in Solar Power. Now There's so Much that Other States are Sometimes Paid to Take It," *Los Angeles Times*, June 22, 2017, http://www.latimes.com/projects/la-fi-electricity-solar/.

56. Peter Philips, "Environmental and Economic Benefits of Building Solar in California," Institute for Research on Labor and Employment at the University of California, Berkeley, November 10, 2014, http://laborcenter.berkeley.edu/pdf/2014/building-solar-ca14.pdf.

57. Intertek APTECH, "Power Plant Cycling Costs," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012, AES 12047831–2-1, http://wind.nrel.gov/public/wwis/aptechfinalv2.pdf.

58. Lion Hirth, Falko Ueckerdt, and Ottmar Edenhofer, "Integration Costs Revisited—An Economic Framework for Wind and Solar Variability," *Renewable Energy* 74 (February 2015): 925–939, doi:10.1016/j.renene.2014.08.065.

59. Bentham Paulos, "Too Much of a Good Thing? An Illustrated Guide to Solar Curtailment on California's Grid," *Greentech Media*, April 3, 2017, https://www.greentechmedia.com/articles/read/An-Illustrated-Guide-to-Solar-Curtailment-in-California.

60. Sara Shapiro-Bengtsen, "Reducing Renewables Curtailment in China—An Air Quality Measure," Regulatory Assistance Project, April 5, 2017, http://www.raponline.org/blog/reducing-renewables-curtailment-china-air-quality-measure.

61. "Renewables Get Mature," *Nature Energy* 2, no. 2 (2017): 17017, doi:10.1038/nenergy.2017.17.

62. Paul Denholm, Kara Clark, and Matt O'Connell, "On the Path to SunShot: Emerging Issues and Challenges in Integrating High Levels of Solar into the Electrical Generation and Transmission System," NREL, 2016, NREL/TP-6A20–65800, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65800.pdf.

63. Jan Von Appen, M. Braun, T. Stetz, K. Diwold, and D. Geibel, "Time in the Sun: The Challenge of High PV Penetration in the German Electric Grid," *IEEE Power and Energy Magazine* 11, no. 2 (March/April 2013): 55–64, doi:10.1109/mpe.2012.2234407.

64. Bryan Bollinger and Kenneth Gillingham, "Learning-by-Doing in Solar otovoltaic Installations," Yale University Working Paper, 2014, http://environment.yale.edu/gillingham/BollingerGillingham_SolarLBD.pdf.

65. Varun Sivaram and Shayle Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," *Nature Energy* 1, no. 4 (April 7, 2016): doi:10.1038/nenergy.2016.36.

66. N.W. Miller, M. Shao, S. Pajic, and R. D'Aquila, "Western Wind and Solar Integration Study Phase 3—Frequency Response and Transient Stability," NREL, 2014, NREL/SR-5D00–62906, http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62906.pdf

67. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus," 2015, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Water_Energy_Food_Nexus_2015.pdf.

68. Paul Denholm and Robert Margolis, "Energy Storage Requirements for Achieving 50% Solar Photovoltaic Energy Penetration in California," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016, NREL/TP-6A20–66595, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66595.pdf.

69. U.S. Department of Energy (DOE), "Grid Energy Storage," December 2013, https://energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/Grid%20Energy%20Storage%20December%202013.pdf.

70. Andrew D. Mills and Ryan H. Wiser, "Strategies to Mitigate Declines in the Economic Value of Wind and Solar at High Penetration in California," *Applied Energy* 147 (2015): 269–278, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.014.

Chapter 4

1. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), "Renewables 2015 Global Status Report," http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf.

2. Christopher Martin, "SunEdison Emerging as Solar 'Supermajor' with $2.2 Billion Deal," *Bloomberg*, July 20, 2015, https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-07-20/sunedison-agrees-to-acquire-vivint-solar-for-2-2-billion.

3. Antoine Gara, "SunEdison's Big Slide: When Financial Engineering Goes Wrong," *Forbes*, November 13, 2015, http://www.forbes.com/sites/antoinegara/2015/11/13/sunedisons-big-slide-when-financial-engineering-goes-wrong/.

4. Stephen Foley and Ed Crooks, "SunEdison: Death of a Solar Star," *Financial Times*, April 21, 2016, https://www.ft.com/content/04fca062-07a3-11e6-a70d-4e39ac32c284.

5. Angus McCrone and Michael Liebreich, "Yieldcos—Two Big Questions," *Bloomberg New Energy Finance*, July 30, 2015, https://about.bnef.com/blog/mccrone-liebreich-yieldcos-two-big-questions/.

6. Tom Hals, "TerraForm Global Sues SunEdison, Says Misappropriated $231 Million," *Reuters*, April 4, 2016, http://www.reuters.com/article/us-terraform-sunedison-lawsuit-idUSKCN0X11UC.

7. Lewis Milford, Devashree Saha, Mark Muro, Robert Sanders, and Toby Rittner, "Clean Energy Finance Through the Bond Market: A New Option for Progress," Brookings-Rockefeller, April 2014, https://www.cdfa.net/cdfa/cdfaweb.nsf/ord/brookings-cdfa-ceg-041614.html/$file/CleanEnergyFunds.pdf.

8. E. Cabell Massey, "Master Limited Partnerships: A Pipeline to Renewable Energy Development," University of Colorado Law School, April 11, 2016, http://lawreview.colorado.edu/wp-content/uploads/2016/01/12.-87.3-Massey_Final.pdf.

9. Preqin, "Global Infrastructure Report." 2017, https://www.preqin.com/item/2017-preqin-global-infrastructure-report/4/16507.

10. Antoine Gara, "Blackstone Unveils $40 Billion Infrastructure Mega Fund with Saudi Arabia as President Trump Visits," *Forbes*, May 20, 2017, https://www.forbes.com/sites/antoinegara/2017/05/20/blackstone-unveils-40-billion-infrastructure-mega-fund-with-saudi-arabia-as-trump-visits/.

11. Felix Mormann and Dan Reicher, "Smarter Finance for Cleaner Energy: Open up Master Limited Partnerships (MLPs) and Real Estate Investment Trusts (REITs) to Renewable Energy Investment," Brookings Institute, November 2012, https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/13-clean-energy-investment.pdf.

12. Ehren Goossens, "Market 'Saturated' by Yieldcos After 15 IPOs, Says NRG Yield CEO," *Bloomberg*, August 5, 2015, https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-08-05/market-saturated-by-yieldcos-after-15-ipos-says-nrg-yield-ceo.

13. Ernst & Young, "The YieldCo Structure: Unlocking the Value in Power Generation Assets," Ernst & Young Global Limited, 2015, http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-yieldco-brochure/$FILE/ey-yieldco-brochure.pdf.

14. Christopher Martin, "SunEdison Thirst for Yield Growth Drove $2.2 Billion Vivint Deal," *Bloomberg Technology*, July 21, 2015, https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-07-21/sunedison-thirst-for-yield-growth-drove-2-2-billion-vivint-deal.

15. Tom Konrad, "The YieldCo Boom and Bust: The Consequences of Greed and a Return to Normalcy," *Greentech Media*, May 13, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-yieldco-boom-and-bust-the-consequences-of-greed.

16. John Dizard, "Yieldcos Have Caught Some Terrible Money Plague," *Financial Times*, September 11, 2015, https://www.ft.com/content/a1811362-5873-11e5-a28b-50226830d644.

17. Varun Sivaram, "Oil's Downward Spiral Is Spooking Renewable Energy Investors," *Fortune*, September 5, 2015, fortune.com/2015/09/05/oil-prices-renewable-energy-yieldcos.

18. Uday Varadarajan, David Nelson, Andrew Goggins, and Morgan Hervé-Mignucci, "Beyond YieldCos," Climate Policy Initiative (CPI), June, 2016, http://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2016/06/Beyond-YieldCos-1.pdf.

19. Ronald Barusch, "Dealpolitik: Governance Was a Casualty of SunEdison's Financial Crisis," *The Wall Street Journal*, April 15, 2016, http://blogs.wsj.com/moneybeat/2016/04/15/dealpolitik-governance-was-a-casualty-of-sunedisons-financial-crisis.

20. "Financing India's Clean Energy Transition," Bloomberg New Energy Finance, November 1, 2016, https://www.bbhub.io/bnef/sites/4/2016/10/BNEF-Financing-Indias-clean-energy-transition.pdf.

21. Uday Varadarajan, David Nelson, Andrew Goggins, and Morgan Hervé-Mignucci, "Beyond YieldCos," Climate Policy Initiative, June 2016, https://climatepolicyinitiative.org/publication/beyond-yieldcos.

22. Richard Matsui, "Yieldcos, a Modern Solar Shakespearean Play," *PV Magazine*, May 16, 2017, https://pv-magazine-usa.com/2017/05/16/op-ed-yieldcos-a-modern-solar-shakespearean-play.

23. David C. Magagna, "Congress, Give Renewable Energy a Fair Fight: Passage of the Master Limited Partnerships Parity Act Would Give Renewable Energy the Financial Footing Needed to Independently Succeed," *Villanova Environmental Law Journal* 27 (2016): 149, http://digitalcommons.law.villanova.edu/elj/vol27/iss1/6.

24. Francis M. O'Sullivan and Charles H. Warren, "Solar Securitization: An Innovation in Renewable Energy Finance," MIT Energy Initiative Working Paper, July 2016, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/07/MITEI-WP-2016-05.pdf.

25. Spriha Srivastava, "This Is the Next Subprime Fear Worrying Investors," *CNBC*, April 7, 2017, http://www.cnbc.com/2017/04/07/subprime-mortgage-autos-ubs-us.html.

26. Ann Carrns, "New Cars Are Too Expensive for the Typical Family, Study Finds," *The New York Times*, July 1, 2016, https://www.nytimes.com/2016/07/02/your-money/new-cars-are-too-expensive-for-the-typical-family-study-finds.html?_r=0.

27. Center for Sustainable Energy (CSE). "How Much Does a Typical Residential Solar Electric System Cost?" December 19, 2016, https://energycenter.org/solar/home owners/cost.

28. Mike Munsell, "Direct Ownership of Solar Will Overtake Leasing in the US by 2017," *Greentech Media*, November 15, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles /read/us-residential-solar-purchases-will-overtake-leasing-in-2017.

29. Drew Hyde and Paul Komor, "Distributed PV and Securitization: Made for Each Other?" *Electricity Journal* 27, no. 5 (2014): 63–70, doi:10.1016/j.tej.2014.05.002.

30. Pieter Gagnon, Robert Margolis, Jennifer Melius, Caleb Phillips, and Ryan Elmore, "Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016, http:// www.nrel.gov/docs/fy16osti/65298.pdf.

31. Travis Lowder, Paul Schwabe, Ella Zhou, and Douglas J. Arent, "Historical and Current U.S. Strategies for Boosting Distributed Generation," National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64843.pdf.

32. Solar Energy Industry Association (SEIA), "Expanding Solar Deployment Opportunities in the C&I Sector," November 2016, http://www.seia.org/sites/default/files /resources/SEIA-CPACE_Expanding_Solar_Deployment_CI_Sector_April2017.pdf.

33. Sandeep Gupta, Jai Sharda, and Gireesh Shrimali, "The Drivers and Challenges of Third-Party Financing for Rooftop Solar Power in India," Climate Policy Initiative (CPI), September 2016, https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2016 /09/The-Drivers-and-Challenges-of-Third-Party-Financing-for-Rooftop-Solar-Power -in-India.pdf.

34. Danielle Ola, "US Solar Market Maturity Means Securitisation on the Horizon," *PV-Tech*, September 22, 2016, http://www.pv-tech.org/news/us-solar-market-maturity -means-securitisation-on-the-horizon.

35. Frank Andorka, "Mosaic Secures Investor Support for Residential Loan Portfolio," *PV International*, February 10, 2017, https://www.pv-magazine.com/2017/02/10/mosaic -secures-investor-support-for-residential-loan-portfolio/.

36. O'Sullivan and Warren, "Solar Securitization: An Innovation in Renewable Energy Finance."

37. Labanya Prakash Jena, Vinit Atal, Dr. Gireesh Shrimali, and Vivek Sen. "Rooftop Solar Private Sector Financing Facility," India Innovation Lab for Green Finance, http://greenfinancelab.in/idea/rooftop-solar-private-sector-financing-facility.

38. Galen L. Barbose and Naïm R. Darghouth, "Tracking the Sun IX: The Installed Price of Residential and Non-Residential Photovoltaic Systems in the United States,"

Lawrence Berkeley National Laboratory, August 2016, https://emp.lbl.gov/publications/tracking-sun-ix-installed-price.

39. Jason Kaminsky, "Can Data Rescue Solar Stocks? Google Is Leading the Way," *Greentech Media*, March 9, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Can-Data-Rescue-Solar-Stocks-Google-is-Leading-the-Way.

40. Ben Gallagher, "U.S. PV System Pricing H2 2016: System Pricing, Breakdowns, and Forecasts," GTM Research, November 2016, https://www.greentechmedia.com/research/report/us-solar-pv-system-pricing-h2-2016.

41. M. A. Cohen, P. A. Kauzmann, and D. S. Callaway, "Effects of Distributed PV Generation on California's Distribution System, Part 2: Economic Analysis," *Solar Energy* 128 (2016): 139–152, doi:10.1016/j.solener.2016.01.004.

42. Ignacio Pérez-Arriaga and Christopher Knittel, "Utility of the Future," MIT Energy Initiative Working Paper, 2016, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2016/12/Utility-of-the-Future-Full-Report.pdf.

43. Michael Cragg, Richard Goldberg, Varoujan Khatchatrian, and Jehan DeFonseka, "Cleaning up Spark Spreads," The Brattle Group, March 2011, http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/004/693/original/Cleaning_Up_Spark_Spreads_-_How_Plant_Owners_Can_Reduce_Risk_Through_Carbon_Markets_March_2011.pdf?1378772120.

44. Richard Matsui, Jason Kaminsky, and Jared Blanton, "New Product: Solar Revenue Puts Project Finance," Chadbourne & Parke LLP, October 2016, https://www.chadbourne.com/new-product-solar-revenue-puts-project-finance-october-2016.

45. Travis Bradford, Peter Davidson, Lawrence Rodman, and David Sandalow, "Financing Solar and Wind Power: Insights from Oil and Gas," Columbia University Center for Global Energy Policy, 2017, http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/Financing%20Solar%20and%20Wind%20Power.pdf.

46. Mark Clifford, "Hong Kong Utility Executive on Paris Climate Talks: 'The World Doesn't Want Another Failure,'" *Forbes*, October 19, 2015, http://www.forbes.com/sites/mclifford/2015/10/12/hong-kong-utility-executive-on-paris-climate-talks-the-world-doesnt-want-another-failure.

47. CLP Holdings Limited, "Operating Information," 2014, https://www.clpgroup.com/en/investors-information/quick-facts/operating-information.

48. Travis Bradford, Peter Davidson, Lawrence Rodman, and David Sandalow. "Financing Solar and Wind Power: Insights from Oil and Gas," Columbia University Center on Global Energy Policy, March 2017, http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/Financing%20Solar%20and%20Wind%20Power.pdf.

49. Mike Munsell, "America's Community Solar Market Will Surpass 400MW in 2017," *Greentech Media*, February 6, 2017, https://www.greentechmedia.com/articles/read/us-community-solar-market-to-surpass-400-mw-in-2017.

50. Michael Wara, "Competition at the Grid Edge: Innovation and Antitrust Law in the Electricity Sector," *New York University Environmental Law Journal* 25, no. 2 (2016): https://ssrn.com/abstract=2765502.

51. Eric Wesoff, "Report: How Much Does a Solar PV System Cost in 2016?" *Greentech Media*, November 30, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Report-How-much-does-a-solar-PV-system-cost-in-2016.

52. Can Sener and Vasilis Fthenakis, "Energy Policy and Financing Options to Achieve Solar Energy Grid Penetration Targets: Accounting for External Costs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014): 854–68, doi:10.1016/j.rser.2014.01.030.

53. "On Bill Energy Efficiency Repayment Plan," Environmental Defense Fund, 2011, http://blogs.edf.org/energyexchange/files/2011/09/On-Bill-Repayment-Summary.pdf.

54. Herman K. Trabish, "How Record Large-Scale Solar Growth Is Changing Utility IPPs," Utility Dive, July 21, 2016, http://www.utilitydive.com/news/how-record-large-scale-solar-growth-is-changing-utility-ipps/422726.

55. Tim Buckley and Simon Nicholas, "2016: Year in Review," Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), November 2016, http://ieefa.org/wp-content/uploads/2016/11/2016-Year-in-Review.pdf.

56. Tim Buckley and Simon Nicholas, "China's Global Renewable Energy Expansion," Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), January 2017, http://ieefa.org/wp-content/uploads/2017/01/Chinas-Global-Renewable-Energy-Expansion_January-2017.pdf.

57. Andrew Mulherkar, "Google, Amazon, and Apple Are Forging the Future of Corporate Energy Management," *Greentech Media*, July 8, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/What-Google-Amazon-and-Apples-Recent-Moves-Reveal-About-the-Future-of-Cor.

58. Julian Spector, "How MGM Prepared Itself to Leave Nevada's Biggest Utility," *Greentech Media*, September 16, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/How-MGM-Prepared-Itself-to-Leave-Nevadas-Biggest-Utility.

59. Julia Pyper, "Large Corporations Are Driving America's Renewable Energy Boom. And They're Just Getting Started," *Greentech Media*, January 10, 2017, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Large-Corporations-Are-Driving-Americas-Renewable-Energy-Boom.

60. Aaron Bielenberg, Mike Kerlin, Jeremy Oppenheim, and Melissa Roberts. "Financing Change: How to Mobilize Private-Sector Financing for Sustainable Infrastructure," McKinsey & Co., January 2016, https://councilcommunity.files.wordpress.com/2016/03/financing_change_how_to_mobilize_private-sector_financing_for_sustainable-_infrastructure.pdf.

61. Christopher Kaminker and Fiona Stewart, "The Role of Institutional Investors in Financing Clean Energy," OECD Working Papers on Finance, Insurance and Private Pensions 23, August 2012, http://www.oecd.org/environment/WP_23_TheRoleOfInstitutionalInvestorsInFinancingCleanEnergy.pdf.

62. "Unlocking Renewable Energy Investment: The Role of Risk Mitigation and Structured Finance," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016, https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Risk_Mitigation_and_Structured_Finance_2016.pdf.

63. Project Finance International (PFI), "The Innovative Seven Sisters," Thompson Reuters, 2015, http://www.pfie.com/the-innovative-seven-sisters/21177319.fullarticle.

64. "What Are Green Bonds?" World Bank Group (WBG), 2015, http://treasury.worldbank.org/cmd/pdf/What_are_Green_Bonds.pdf.

65. Climate Bonds Initiative, "Bonds and Climate Change the State of the Market in 2016," Hongkong and Shanghai Banking Corporation (HSBC) Limited, 2016, https://www.climatebonds.net/files/files/reports/cbi-hsbc-state-of-the-market-2016.pdf.

66. Swarnalakshmi Umamaheswaran and Seth Rajiv, "Financing Large-Scale Wind and Solar Projects—A Review of Emerging Experiences in the Indian Context," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015): 166–177, doi:10.1016/j.rser.2015.02.054.

67. Arsalan Ali Farooquee and Gireesh Shrimali, "Reaching India's Renewable Energy Targets Cost-Effectively: A Foreign Exchange Hedging Facility," Climate Policy Initiative (CPI), June 2015, https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2015/06/Reaching-Indias-Renewable-Energy-Targets-Foreign-Exchange-Hedging-Facility_Technical-Paper.pdf.

Chapter 5

1. "Off-Grid Electric: Overview." Crunchbase, Inc. 2017, https://www.crunchbase.com/organization/off-grid-electric#/entity.

2. Varun Mehra, "Mobile Money: The Answer to Sustaining Revenue for Off-Grid Energy Service Providers?" The Energy Collective, November 20, 2015, http://www.theenergycollective.com/vmehra813/2286309/mobile-money-answer-sustaining-revenue-grid-energy-service-providers.

3. "Off-Grid and Mini-Grid: Q1 2017 Market Outlook," *Bloomberg New Energy Finance*, January 5, 2017, https://about.bnef.com/blog/off-grid-mini-grid-q1-2017-market-outlook/.

4. Saule Baurzhan and Glenn P. Jenkins, "Off-Grid Solar PV: Is It an Affordable or Appropriate Solution for Rural Electrification in Sub-Saharan African Countries?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016): 1405–1418, doi:10.1016/j.rser.2016.03.016.

5. Todd Moss and Benjamin Leo, "Maximizing Access to Energy: Estimates of Access and Generation for the Overseas Private Investment Corporation's Portfolio," Center for Global Development, January 2014, https://www.cgdev.org/publication/maximizing-access-energy-estimates-access-and-generation-overseas-private-investment.

6. Michael A. Levi, "Is U.S. Fossil Fuel Policy Keeping Millions Poor?" *Energy, Security, and Climate Blog, Council on Foreign Relations*, February 10, 2014, https://wwwhttps://www.cfr.org/blog/us-fossil-fuel-policy-keeping-millions-poor.

7. Mark Caine et al., "Our High Energy Planet," Breakthrough Institute, April 2014, http://thebreakthrough.org/images/pdfs/Our-High-Energy-Planet.pdf.

8. Morgan Bazilian and Roger Pielke, "Making Energy Access Meaningful," *Issues in Science and Technology* 29 (4): 74–78, http://sciencepolicy.colorado.edu/admin/publication_files/2013.22.pdf.

9. Ted Nordhaus, Shaiyra Devi, and Alex Trembath, "Debunking Microenergy: The Future Lies with Urbanization," *Foreign Affairs*, August 2016, https://www.foreignaffairs.com/articles/2016-08-30/debunking-microenergy.

10. Peter Alstone, Dimitry Gershenson, and Daniel M. Kammen, "Decentralized Energy Systems for Clean Electricity Access," *Nature Climate Change* 5, no. 4 (2015): 305–314, doi:10.1038/nclimate2512.

11. Sudeshna Ghosh Banerjee, Alejandro Moreno, Jonathan Sinton, Tanya Primiani, and Joonkyung Seong, "Regulatory Indicators for Sustainable Energy: A Global Scorecard for Policy Makers 2016," World Bank Group (WBG), 2016, http://documents.worldbank.org/curated/en/538181487106403375/pdf/112828-REVISED-PUBLIC-RISE-2016-Report.pdf.

12. Anton Eberhard, Katharine Gratwick, Elvira Morella, and Pedro Antmann, "Accelerating Investments in Power in Sub-Saharan Africa," *Nature Energy* 2 (2017): doi:10.1038/nenergy.2017.5, http://www.nature.com/articles/nenergy20175.

13. International Energy Agency (IEA), *Africa Energy Outlook*, 2014, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014_AfricaEnergyOutlook.pdf.

14. Global Off-Grid Lighting Association (GOGLA), "Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data," October 2016, https://www.gogla.org

/sites/default/files/recource_docs/global_off-grid_solar_market_report_jan-june_2016_public.pdf.

15. PricewaterhouseCoopers (PwC), "Electricity Beyond the Grid," May 2016, https://www.pwc.com/gx/en/energy-utilities-mining/pdf/electricity-beyond-grid.pdf.

16. Bloomberg New Energy Finance (BNEF), Lighting Global, and Global Off-Grid Lighting Association, "Off-Grid Market Trends Report 2016," February 2016, http://www.energynet.co.uk/webfm_send/1690.

17. Shahriar Chowdhury, Shakila Aziz, Sebastian Groh, Hannes Kirchhoff, and Walter Leal Filho, "Off-Grid Rural Area Electrification Through Solar-Diesel Hybrid Minigrids in Bangladesh: Resource-Efficient Design Principles in Practice," *Journal of Cleaner Production* 95 (2015): 194–202, doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.062.

18. Global Off-Grid Lighting Association (GOGLA), "Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data."

19. World Bank Group (WBG), "Solar Program Brings Electricity to Off-the-Grid Rural Areas in Bangladesh," October 12, 2016, http://www.worldbank.org/en/news/feature/2016/10/10/solar-program-brings-electricity-off-grid-rural-areas.

20. Shahidur R. Khandker et al., *Surge in Solar-Powered Homes: Experience in Off-Grid Rural Bangladesh* (Washington, DC: World Bank Group, 2014).

21. Several firms may have independently conceived the PAYG model, and it is difficult to determine which was first. For example, Robert Trezona, a British venture capitalist, recounted to me a 2010 board meeting for the East African start-up Azuri in which the founders presented the idea of using mobile payments to implement the PAYG model.

22. Stephan Faris, "The Solar Company Making a Profit on Poor Africans," *Bloomberg*, December 2, 2015, https://www.bloomberg.com/features/2015-mkopa-solar-in-africa/.

23. Sam Pothecary, "New Solar Frontiers: Unconnected Africa," *PV Magazine*, June 2016, https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/new-solar-frontiers-unconnected-africa_100025029/.

24. Ijeoma Onyeji-Nwogu, Todd Moss, and Morgan Bazilian, "The Digital Transformation and Disruptive Technologies: Challenges and Solutions for the Electricity Sector in African Markets," Center for Global Development, May 30, 2017, https://www.cgdev.org/sites/default/files/challenges-and-solutions-electricity-sector-african-markets-final.pdf.

25. P. Sharath Chandra Rao, Jeffrey B. Miller, Young Doo Wang, and John B. Byrne, "Energy-Microfinance Intervention for Below-Poverty-Line Households in India," *Energy Policy* 37, no. 5 (2009): 1694–1712, doi:10.1016/j.enpol.2008.12.039.

26. Subhes C. Bhattacharyya, "Financing Energy Access and Off-Grid Electrification: A Review of Status, Options and Challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013): 462–472, doi:10.1016/j.rser.2012.12.008.

27. Justin Guay, "The World's First Securitization of Off-Grid Solar Assets," *Greentech Media*, December 17, 2015, https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-worlds-first-securitization-of-off-grid-solar-assets.

28. Muthukumara Mani, *Assessing the Investment Climate for Climate Investments: A Comparative Framework for Clean Energy Investments in South Asia in a Global Context* (Washington, DC: World Bank, 2012).

29. James Crabtree, "India's Newly-Licensed Banks Carry Potential Seeds of Revolution," *Financial Times*, October 11, 2015, https://www.ft.com/content/fa50b6b2-6072-11e5-9846-de406ccb37f2.

30. Sevea Association, "Case Study Simpa," January 2013, http://www.seveaconsulting.com/wp-content/uploads/2016/02/Case_study_Simpa.pdf.

31. Paras Loomba, Sonal Asgotraa, and Robin Podmore, "DC Solar Micro-Grids—A Successful Technology for Rural Sustainable Development," *2016 IEEE PES PowerAfrica* (2016): doi:10.1109/powerafrica.2016.7556601.

32. Rohit Sen and Subhes C. Bhattacharyya, "Off-Grid Electricity Generation with Renewable Energy Technologies in India: An Application of HOMER," *Renewable Energy* 62 (2014): 388–398, doi:10.1016/j.renene.2013.07.028.

33. Ruud Kempener et al., *Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Methodological Issues* (Abu Dhabi: IRENA, 2015), http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf.

34. World Bank Group (WBG), "Scaling up Access to Electricity: Pay-as-You-Go Plans in Off-Grid Energy Services," 2015, http://documents.worldbank.org/curated/en/687851468320946678/pdf/937860REPF0BRI0ries00000LW150340OKR.pdf.

35. Kartikeya Singh, "Business Innovation and Diffusion of Off-Grid Solar Technologies in India," *Energy for Sustainable Development* 30 (2016): 1–13, doi:10.1016/j.esd.2015.10.011.

36. Neeraj Ramchandran, Rajesh Pai, and Amit Kumar Singh Parihar, "Feasibility Assessment of Anchor-Business-Community Model for Off-Grid Rural Electrification in India," *Renewable Energy* 97 (2016): 197–209, doi:10.1016/j.renene.2016.05.036.

37. "Solar Microgrid Firm Vies for Kenya's Last Mile Power Customers," *Reuters*, July 10, 2015, http://sustainability.thomsonreuters.com/2015/07/10/solar-microgrid-firm-vies-for-kenyas-last-mile-power-customers/.

38. Ashok Jhunjhunwala, "Innovative Direct-Current Micro-Grids to Solve India's Power Woes," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, January 31,

2017, http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/innovative-direct-current-microgrids-to-solve-indias-power-woes.

39. Varun Mehra, "Optimal Sizing of Solar and Battery Assets in Decentralized Micro-Grids with Demand-Side Management," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2017.

40. Amol A. Phadke et al., "Powering a Home with Just 25 Watts of Solar PV. Super-Efficient Appliances Can Enable Expanded Off-Grid Energy Service Using Small Solar Power Systems," *Lawrence Berkeley National Laboratory* (2015): doi:10.2172/1229861.

41. Ashok Jhunjhunwala, Krishna Vasudevan, Lakshmi Narasamma, and Bhaskar Ramamurthi, "Technological and Deployment Challenges and User-Response to Uninterrupted DC (UDC) Deployment in Indian Homes," *IEEE* (2015): doi:10.1109/ICDCM.2015.7152006.

42. The Secretary General's Advisory Group on Energy and Climate Change (AGECC), "Energy for a Sustainable Future," United Nations, April 28, 2010, http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/AGECCsummaryreport[1].pdf.

43. Michaël Aklin, Chao-Yo Cheng, Johannes Urpelainen, Karthik Ganesan, and Abhishek Jain, "Factors Affecting Household Satisfaction with Electricity Supply in Rural India," *Nature Energy* 1, no. 11 (2016): 16170, doi:10.1038/nenergy.2016.170.

44. Santosh M. Harish, Kaveri K. Iychettira, Shuba V. Raghavan, and Milind Kandlikar, "Adoption of Solar Home Lighting Systems in India: What Might We Learn from Karnataka?" *Energy Policy* 62 (2013): 697–706, doi:10.1016/j.enpol.2013.07.085.

45. Ashok Jhunjhunwala, "Innovative Direct-Current Micro-Grids to Solve India's Power Woes," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, January 31, 2017, http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/innovative-direct-current-microgrids-to-solve-indias-power-woes.

46. Hannes Kirchhoff, Noara Kebir, Kirsten Neumann, Peter W. Heller, and Kai Strunz, "Developing Mutual Success Factors and Their Application to Swarm Electrification: Micro-Grids with 100% Renewable Energies in the Global South and Germany," *Journal of Cleaner Production* 128 (2016): 190–200, doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.080.

47. Sebastian Groh and Mathias Koepke, "A System Complexity Approach to Swarm Electrification," University College London, 2015, http://discovery.ucl.ac.uk/1469412/1/283-290.pdf.

48. Sara Baidei, "'Swarm Electrification' in Bangladesh Lets Neighbours Swap Solar Electricity," *Motherboard*, November 29, 2016, https://motherboard.vice.com/en_us/article/mesolshare-rural-bangladesh-swarm-electrification-off-the-grid.

49. Bloomberg New Energy Finance (BNEF) "Off-Grid Market Trends Report 2016," *Bloomberg New Energy Finance and Lighting Global in cooperation with the Global Off-Grid Lighting Association,* February 2016, http://www.energynet.co.uk/webfm_send/1690.

50. Stephen D. Comello, Stefan J. Reichelstein, Anshuman Sahoo, and Tobias S. Schmidt, "Enabling Mini-Grid Development in Rural India," *World Development* 93 (2017): 94-107, doi: 10.1016/j.worlddev.2016.12.029.

51. Bernard Tenenbaum, Chris Greacen, Tilak Siyambalapitiya, and James Knuckles, *From the Bottom Up: How Small Power Producers and Mini-Grids Can Deliver Electrification and Renewable Energy in Africa* (Washington, DC: World Bank Group, 2014), https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/16571/9781464800931.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

52. Bloomberg New Energy Finance, "Q1 2017 Off-Grid and Mini-Grid Market Outlook," January 18, 2017, https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/01/BNEF-2017-01-05-Q1-2017-Off-grid-and-Mini-grid-Market-Outlook.pdf.

53. Dimitrios Mentis et al., "A GIS-Based Approach for Electrification Planning—A Case Study on Nigeria," *Energy for Sustainable Development* 29 (2015): 142–150, doi:10.1016/j.esd.2015.09.007.

54. Varun Sivaram, "India: The Global Warming Wild Card," *Scientific American* 316, May 2017, 48-53, doi: 10.1038/scientificamerican0517-48.

55. Subhes C. Bhattacharyya and Debajit Palit, "Mini-Grid Based Off-Grid Electrification to Enhance Electricity Access in Developing Countries: What Policies May Be Required?" *Energy Policy* 94 (2016): 166–178, doi:10.1016/j.enpol.2016.04.010.

56. X. Shi et al., "Assessment of Instruments in Facilitating Investment in Off-Grid Renewable Energy Projects," *Energy Policy* (2016), doi:10.1016/j.enpol.2016.02.001i.

Chapter 6

1. Henry Snaith, *Google Scholar Statistics,* https://scholar.google.com/citations?user=I2D3pUMAAAAJ&hl=en.

2. Thomson Reuters IP & Science, "Thomson Reuters Announces the World's Most Influential Scientific Minds," *PR Newswire*, January 13, 2016, http://www.prnewswire.com/news-releases/thomson-reuters-announces-the-worlds-most-influential-scientific-minds-300204299.html.

3. M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites," *Science* 338, no. 6107 (2012): 643–647, doi:10.1126/science.1228604.

4. Juan-Pablo Correa-Baena et al., "The Rapid Evolution of Highly Efficient Perovskite Solar Cells," *Energy & Environmental Science* 10, no. 3 (2017): doi: 10.1039/c6ee03397k.

5. Sarah Kurtz et al., "Solar Research Not Finished," *Nature Photonics* 10, no. 3 (2016): 141–142, doi:10.1038/nphoton.2016.16.

6. Martin Green and Stephen Bremner, "Energy Conversion Approaches and Materials for High-Efficiency Photovoltaics," *Nature Materials* 16, no. 1 (2016): 23–34, doi: 10.1038/nmat4676.

7. Giles Eperon and David Ginger, "Perovskite Solar Cells: Different Facets of Performance," *Nature Energy* 1, no. 8 (2016): 16109, doi:10.1038/nenergy.2016.109.

8. Yaowen Li et al., "High-Efficiency Robust Perovskite Solar Cells on Ultrathin Flexible Substrates," *Nature Communications* 7 (2016): 10214, doi: 10.1038/ncomms10214.

9. Steve Albrecht and Bernd Rech, "Perovskite Solar Cells: On Top of Commercial Photovoltaics," *Nature Energy* 2, no. 1 (2017): 16196, doi:10.1038/nenergy.2016.196.

10. David Mcmeekin et al., "A Mixed-Cation Lead Mixed-Halide Perovskite Absorber for Tandem Solar Cells," *Science* 351, no. 6269 (2016): 151–155, doi:10.1126/science.aad5845.

11. Kevin Bush et al., "23.6%-efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with Improved Stability," *Nature Energy* 2 (2017): 17009, doi:10.1038/nenergy.2017.9.

12. Fan Fu et al., "High-Efficiency Inverted Semi-Transparent Planar Perovskite Solar Cells in Substrate Configuration," *Nature Energy* 2, no. 1 (2016): 16190, doi:10.1038/nenergy.2016.190.

13. Giles Eperon et al., "Perovskite-Perovskite Tandem Photovoltaics with Optimized Band Gaps," *Science* 354, no. 6314 (2016): 861–865, doi:10.1126/science.aaf9717.

14. Albrecht and Rech, "Perovskite Solar Cells: On Top of Commercial Photovoltaics."

15. Zhengshan Yu, Mehdi Leilaeioun, and Zachary Holman, "Selecting Tandem Partners for Silicon Solar Cells," *Nature Energy* 1, no. 11 (2016): 16137, doi:10.1038/nenergy.2016.137.

16. Kathryn Nave, "The Simple, Cheap Trick That Makes Solar Panels More Efficient," *Wired UK*, January 31, 2017, http://www.wired.co.uk/article/solar-panels-boosting-efficiency.

17. Donqin Bi et al., "Efficient Luminescent Solar Cells Based on Tailored Mixed-Cation Perovskites," *Science Advances* 2, no. 1 (2016): doi:10.1126/sciadv.1501170.

18. Michael Saliba, Wolfgang Tress, Antonio Abate, and Michael Grätzel, "Incorporation of Rubidium Cations into Perovskite Solar Cells Improves Photovoltaic Performance," *Science* 354, no. 6309 (2016): 206–209, doi:10.1126/science.aah5557.

19. Regan Wilks and Marcus Bär, "Perovskite Solar Cells: Danger from Within," *Nature Energy* 2, no. 1 (2017): 16204, doi:10.1038/nenergy.2016.204.

20. Wanyi Nie et al. "Light-Activated Photocurrent Degradation and Self-Healing in Perovskite Solar Cells," *Nature Communications* 7 (2016): 11574, doi:10.1038/ncomms11574.

21. Angèle Reinders, Pierre Verlinden, Wilfridus Sark, and Alexandre Freundlich, *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*, (Chichester, U.K.: Wiley, 2017).

22. Giulia Grancini et al., "One-Year Stable Perovskite Solar Cells by 2D/3D Interface Engineering." *Nature Communications* (2017), doi: 10.1038/ncomms15684.

23. Wilson Da Silva, "Trendy Solar Cells Hit New World Efficiency Record," UNSW Newsroom, 2016, http://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/trendy-solar-cells-hit-new-world-efficiency-record.

24. Mengjin Yang et al., "Perovskite Ink with Wide Processing Window for Scalable High-Efficiency Solar Cells," *Nature Energy* 2 (2017): https://www.nature.com/articles/nenergy201738.

25. Xiong Li, Dongqi Bi, and Chenyi Yi, "A Vacuum Flash-Assisted Solution Process for High-Efficiency Large-Area Perovskite Solar Cells," *Science* 353, no. 6294 (2016): 58–62, doi: 10.1126/science.aaf8060.

26. Hairen Tan et al., "Efficient and Stable Solution-Processed Planar Perovskite Solar Cells via Contact Passivation," *Science* 355, no. 6326 (2017): 722–726, doi:10.1126/science.aai9081.

27. See Grid Edge Solar, a research program at the Massachusetts Institute of Technology (MIT): http://www.gridedgesolar.com.

28. Nam-Gyu Park, Michael Grätzel, Tsutomu Miyasaka, Kai Zhu, and Keith Emery, "Towards Stable and Commercially Available Perovskite Solar Cells," *Nature Energy* 1, no. 11 (2016): 16152, doi:10.1038/nenergy.2016.152.

29. Herman Trabish, "The Lowdown on the Safety of First Solar's CDTE Thin Film," *Greentech Media*, March 12, 2012, https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-safe-is-first-solars-cdte-thin-film.

30. Nakita Noel et al., "Lead-Free Organic–Inorganic Tin Halide Perovskites for Photovoltaic Applications," *Energy & Environmental Science* 7, no. 9 (2014): 3061, doi: 10.1039/c4ee01076k.

31. K. P. Marshall, M. Walker, R. I. Walton, and R. A. Hatton, "Enhanced Stability and Efficiency in Hole-Transport-Layer-Free CsSnI3 Perovskite Photovoltaics," *Nature Energy* 1 (2016): 16178, doi:10.1038/nenergy.2016.178.

32. Prakash Singh and O. S. Kushwaha, "Progress Towards Efficiency of Polymer Solar Cells," *Advanced Materials Letters* 8, no. 1 (2016): 2–7, doi:10.5185/amlett.2017.7005.

33. Guglielmo Lanzani, Annamaria Petrozza, and Mario Caironi, "Organics Go Hybrid," *Nature Photonics* 11, no. 1 (2017): 20–22, doi:10.1038/nphoton.2016.260.

34. Miaomiao Li et al., "Solution-Processed Organic Tandem Solar Cells with Power Conversion Efficiencies >12%," *Nature Photonics* 11, no. 2 (2016): 85–90, doi:10.1038/nphoton.2016.240.

35. Sarah Holliday et al., "High-Efficiency and Air-Stable P3HT-Based Polymer Solar Cells with a New Non-Fullerene Acceptor," *Nature Communications* 7 (2016): 11585, doi: 10.1038/ncomms11585.

36. Jean-Luc Brédas, Edward Sargent, and Gregory Scholes, "Photovoltaic Concepts Inspired by Coherence Effects in Photosynthetic Systems," *Nature Materials* 16, no. 1 (2016): 35–44, doi: 10.1038/nmat4767.

37. Mingjian Yuan, Mengxia Liu, and Edward Sargent, "Colloidal Quantum Dot Solids for Solution-Processed Solar Cells," *Nature Energy* 1, no. 3 (2016): 16016, doi:10.1038/nenergy.2016.16.

38. Abhishek Swarnkar et al., "Quantum Dot-Induced Phase Stabilization of CsPbI3 Perovskite for High-Efficiency Photovoltaics," *Science* 354, no. 6308 (2016): 92–95, doi:10.1126/science.aag2700.

39. Hongbo Li, Kaifeng Wu, Jaehoon Lim, Hyung-Jun Song, and Victor Klimov, "Doctor-Blade Deposition of Quantum Dots onto Standard Window Glass for Low-Loss Large-Area Luminescent Solar Concentrators," *Nature Energy* 1 (2016): 16157, doi:10.1038/nenergy.2016.157.

40. Prashant Kamat, "Quantum Dot Solar Cells: The Next Big Thing in Photovoltaics," *Journal of Physical Chemistry Letters* 4, no. 6 (2013): 908–918, doi:10.1021/jz400052e.

41. Francois Lafond et al., "How Well Do Experience Curves Predict Technological Progress? A Method for Making Distributional Forecasts," *Journal of Technological Forecasting and Social Change*. In Press. 2017, https://arxiv.org/pdf/1703.05979.pdf.

42. Nancy M. Haegel et al., "Terawatt-Scale Photovoltaics: Trajectories and Challenges," *Science* 356, no. 6334 (April 14, 2017): doi: 10.1126/science.aal1288.

43. U.S. Department of Energy (DOE) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "The SunShot Initiative's 2030 Goal: 3₵ per Kilowatt Hour for Solar Electricity," December 2016, https://energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/SunShot%20 2030%20Fact%20Sheet-12_16.pdf.

44. Varun Sivaram and Shayle Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," *Nature Energy* 1, no. 4 (April 7, 2016): doi:10.1038/nenergy.2016.36.

45. "The Future of Solar Energy," MIT Energy Initiative, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf.

46. Martin Green, "Commercial Progress and Challenges for Photovoltaics," *Nature Energy* 1, no. 1 (2016): 15015, doi:10.1038/nenergy.2015.15.

47. UN-Habitat, *Slum Almanac 2015–2016* (Nairobi, Kenya: UNON, Publishing Services Section, 2016).

48. Darren Lipomi and Zhenan Bao, "Stretchable, Elastic Materials and Devices for Solar Energy Conversion," *Energy & Environmental Science* 4, no. 9 (2011): 3314, doi: 10.1039/c1ee01881g.

49. Hoyeon Kim et al. "Empowering Semi-Transparent Solar Cells with Thermal-Mirror Functionality," *Advanced Energy Materials* 6, no.14 (2016), doi: 10.1002/aenm.201502466.

50. Moshe Schwartz, Katherine Blakeley, and Ronald O'Rourke, *Department of Defense Energy Initiatives: Background and Issues for Congress* (CRS R42558) (Washington, DC: Congressional Research Service, 2012), https://fas.org/sgp/crs/natsec/R42558.pdf

51. Daisuke Sato, Noboru Yamada, and Koji Tanaka, "Thermal Design of Photovoltaic/Microwave Conversion Hybrid Panel for Space Solar Power System," *IEEE Journal of Photovoltaics* 7, no. 1 (2017): 374–382, doi:10.1109/jphotov.2016.2629843.

52. Paul Marks, "Star Power," *New Scientist* 229, no. 3060 (2016): 38–41, doi: 10.1016/s0262-4079(16)30325-6.

53. Susumu Sasaki, "How Japan Plans to Build an Orbital Solar Farm," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, April 24, 2014, http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/how-japan-plans-to-build-an-orbital-solar-farm.

54. Jeffrey Ball, Dan Reicher, Xiaojing Sun, and Caitlin Pollock, *The New Solar System: China's Evolving Solar Industry and Its Implications for Competitive Solar Power in the United States and the World*, Report, Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, March 20, 2017.

55. Douglas M. Powell et al., "The Capital Intensity of Photovoltaics Manufacturing: Barrier to Scale and Opportunity for Innovation," *Energy and Environmental Science* 12 (2015): http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2015/EE/C5EE01509J#!divAbstrat.

56. W. Brian Arthur, "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events," *The Economic Journal* 99, no. 394 (1989): 116-131, doi: 10.2307/2234208.

57. Robin Cowan, "Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in," *Journal of Economic History* 50, no. 3 (1990): 541-567, http://www.jstor.org/stable/2122817?origin=JSTOR-pdf.

58. Varun Sivaram, "Unlocking Clean Energy," *Issues in Science and Technology* 33, no 2. (Winter 2017): http://issues.org/33-2/unlocking-clean-energy/.

59. David G. Victor and Kassia Yanosek, "The Crisis in Clean Energy: Stark Realities of the Renewables Craze," *Foreign Affairs*, July 2011, https://www.foreignaffairs.com/articles/2011-06-16/crisis-clean-energy.

60. Jonas Meckling et al., "Winning Coalitions for Climate Policy," *Science* 349 (2015), doi: 10.1126/science.aab1336.

Chapter 7

1. Kana Inagaki, "Toyota: Emission Control," *Financial Times*, https://www.ft.com/content/a7ad7876-d0ef-11e5-831d-09f7778e7377.

2. Drew Harwell, "Meet the Mirai: Why Toyota Wants to Make Your Next Car Run on Hydrogen," *Washington Post*, May 12, 2015, https://www.washingtonpost.com/business/economy/meet-the-mirai-why-toyota-wants-to-make-your-next-car-run-on-hydrogen/2015/05/12/0e85b0c0-f7ef-11e4-9030-b4732caefe81_story.html.

3. James Peltz, "Despite Tesla Frenzy, Electric Car Sales Are Far from Robust," *Los Angeles Times*, April 11, 2016, http://www.latimes.com/business/autos/la-fi-agenda-electric-cars-20160411-snap-htmlstory.html.

4. Tian Ying, "China Considers Dialing Back or Delaying Electric Car Quota," *Bloomberg*, March 5, 2017, https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-05/china-considers-dialing-back-electric-car-quota-after-opposition.

5. Chisake Watanabe, "Japan Makes Big Push for Hydrogen Fuel Cells Scorned by Elon Musk as Impractical," *Japan Times*, http://www.japantimes.co.jp/news/2017/02/10/business/tech/japan-makes-big-push-for-hydrogen-fuel-cells-scorned-by-elon-musk-as-impractical.

6. "Toyota Fuel Cell Vehicle: Yoshikazu Tanaka Q&A," The Official Blog of Toyota GB, March 4, 2014, http://blog.toyota.co.uk/toyota-fuel-cell-vehicle-yoshikazu-tanaka-qa.

7. Akshay Singh, Evan Hirsh, Reid Wilk, and Rich Parkin, "2017 Automotive Trends," *PwC/Strategy&*, http://www.strategyand.pwc.com/trend/2017-automotive-industry-trends.

8. Aarian Marshall, "Solar Impulse Just Completed Its Momentous Flight Around the World," *Wired*, July 25, 2016, https://www.wired.com/2016/07/solar-impulse-just-completed-momentous-flight-around-world.

9. Nathan Lewis, "Research Opportunities to Advance Solar Energy Utilization," *Science* 351, no. 6271 (2016): doi:10.1126/science.aad1920.

10. U.S. Energy Information Administration (EIA), "International Energy Outlook 2016," Washington, DC, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf.

11. "Toyota Set to Sell Long-Range, Fast-Charging Electric Cars in 2022," *Reuters*, July 24, 2017, https://www.reuters.com/article/toyota-electric-cars-idUSL3N1KG03L.

12. E. W. Justi, *A Solar-Hydrogen Energy System*, (New York: Springer, 2011).

13. Matthew Shaner, Harry Atwater, Nathan Lewis, and Eric Mcfarland, "A Comparative Technoeconomic Analysis of Renewable Hydrogen Production Using Solar Energy," *Energy Environ. Sci.* 9, no. 7 (2016): 2354–2371, doi: 10.1039/c5ee02573g.

14. Sixto Giménez and Juan Bisquert, *Photoelectrochemical Solar Fuel Production: From Basic Principles to Advanced Devices* (Cham, Switzerland: Springer, 2016).

15. Shu Hu, Chengxiang Xiang, Sophia Haussener, Alan Berger, and Nathan Lewis, "An Analysis of the Optimal Band Gaps of Light Absorbers in Integrated Tandem Photoelectrochemical Water-Splitting Systems," *Energy & Environmental Science* 6, no. 10 (2013): 2984, doi:10.1039/c3ee40453f.

16. Adrian Cho, "Hubs Aim to Reinvent DOE Research Culture," *Science* 340, no. 6135 (2013): 914–918, doi:10.1126/science.340.6135.914.

17. Qimin Yan et al., "Solar Fuels Photoanode Materials Discovery by Integrating High-Throughput Theory and Experiment," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no. 12 (2017): 3040–3043, doi:10.1073/pnas.1619940114.

18. Juan Callejas, Carlos Read, Christopher Roske, Nathan Lewis, and Raymond Schaak, "Synthesis, Characterization, and Properties of Metal Phosphide Catalysts for the Hydrogen-Evolution Reaction," *Chemistry of Materials* 28, no. 17 (2016): 6017–6044, doi:10.1021/acs.chemmater.6b02148.

19. Fadl Saadi, Azhar Carim, and Jesus Velazquez, "Operando Synthesis of Macroporous Molybdenum Diselenide Films for Electrocatalysis of the Hydrogen-Evolution Reaction," *ACS Catalysis* 4, no. 9 (2014): 2866–2873, doi:10.1021/cs500412u.

20. S. Hu et al., "Amorphous TiO2 Coatings Stabilize Si, GaAs, and GaP Photoanodes for Efficient Water Oxidation," *Science* 344, no. 6187 (2014): 1005–1009, doi:10.1126/science.1251428.

21. Erik Verlage et al., "A Monolithically Integrated, Intrinsically Safe, 10% Efficient, Solar-Driven Water-Splitting System Based on Active, Stable, Earth-Abundant Electrocatalysts in Conjunction with Tandem III–V Light Absorbers Protected by Amorphous TiO2films," *Energy & Environmental Science* 8, no. 11 (2015): 3166–3172, doi:10.1039/c5ee01786f.

22. Shannon Bonke et al., "Renewable Fuels from Concentrated Solar Power: Towards Practical Artificial Photosynthesis," *Energy & Environmental Science* 8, no. 9 (2015): 2791–2796, doi: 10.1039/c5ee02214b.

23. Jingshan Luo et al., "Water Photolysis at 12.3% Efficiency via Perovskite Photovoltaics and Earth-Abundant Catalysts," *Science* 345, no. 6204 (2014): 1593–1596, doi:10.1126/science.1258307.

24. Thomas Hamann, "Perovskites Take Lead in Solar Hydrogen Race," *Science* 345, no. 6204 (2014): 1566–1567, doi:10.1126/science.1260051.

25. Stephen Hall, "Daniel Nocera: Maverick Inventor of the Artificial Leaf | Innovators," *National Geographic*, March 24, 2017, http://news.nationalgeographic.com/news/innovators/2014/05/140519-nocera-chemistry-artificial-leaf-solar-renewable-energy.

26. Steven Reece et al., "Wireless Solar Water Splitting Using Silicon-Based Semiconductors and Earth-Abundant Catalysts," *Science* 334, no. 6056 (2011): 645–648, doi:10.1126/science.1209816.

27. Hall, "Daniel Nocera: Maverick Inventor of the Artificial Leaf."

28. Bruce Parkinson, "Advantages of Solar Hydrogen Compared to Direct Carbon Dioxide Reduction for Solar Fuel Production," *ACS Energy Letters* 1 (2016), doi: 10.1021/acsenergylett.6b00377.

29. Harry L. Tuller, "Solar to Fuels Conversion Technologies," MIT Energy Institute, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/03/MITEI-WP-2015-03.pdf.

30. Joseph Montoya et al., "Materials for Solar Fuels and Chemicals," *Nature Materials* 16, no. 1 (2016): 70–81, doi: 10.1038/nmat4778.

31. M. Schreier et al., "Efficient Photosynthesis of Carbon Monoxide from CO2 Using Perovskite Photovoltaics," *Nature Communications* 6, no. 7326 (2015), https://www.nature.com/articles/ncomms8326#methods.

32. Katherine Bourzac, "News Feature: Liquid Sunlight," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, no. 17 (2016): 4545–4548, doi:10.1073/pnas.1604811113.

33. Eva Nichols et al., "Hybrid Bioinorganic Approach to Solar-to-Chemical Conversion," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 37 (2015): 11461–11466, doi:10.1073/pnas.1508075112.

34. Joseph Torella, Christopher Gagliardi, and Janice Chen, "Efficient Solar-to-Fuels Production from a Hybrid Microbial–Water-Splitting Catalyst System," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 8 (2015): 2337–2342, doi:10.1073/pnas.1424872112.

35. Chong Liu et al., "Water Splitting-Biosynthetic System with CO_2 Reduction Efficiencies Exceeding Photosynthesis," *Science* 352, no. 6290 (2016): 1210–1213, doi:10.1126/science.aaf5039.

36. David Biello, "Bionic Leaf Makes Fuel from Sunlight, Water, and Air," *Scientific American*, June 2, 2016, https://www.scientificamerican.com/article/bionic-leaf-makes-fuel-from-sunlight-water-and-air1/.

37. Chong Liu et al, "Ambient Nitrogen Reduction Cycle Using a Hybrid Inorganic–Biological System," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no.25 (2017), doi: 10.1073/pnas.1706371114.

38. George Dvorsky, "Solar Power Plant Can't Figure Out How to Stop Frying Birds," *Gizmodo*, September 2, 2016, http://gizmodo.com/solar-power-plant-can-t-figure-out-how-to-stop-frying-b-1786093431.

39. Cassandra Sweet, "Ivanpah Solar Plant May Be Forced to Shut Down," *Wall Street Journal*, March 16, 2016, https://www.wsj.com/articles/ivanpah-solar-plant-may-be-forced-to-shut-down-1458170858.

40. Sarah Zhang, "A Huge Solar Plant Caught on Fire, and That's the Least of Its Problems," *Wired*, May 23, 2016, https://www.wired.com/2016/05/huge-solar-plant-caught-fire-thats-least-problems/.

41. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), "Renewables 2016 Global Status Report," http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf.

42. Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 10.0." December 2016, https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf.

43. Raphael Minder, "Once a Darling, Spanish Solar Company Abengoa Faces Reckoning, *New York Times*, March 17, 2016, https://www.nytimes.com/2016/03/18/business/international/once-a-darling-spanish-solar-company-abengoa-faces-reckoning.html.

44. Joe Ryan, "NRG's Massive California Solar Plant Finally Making Enough Power," *Bloomberg*, February 1, 2017, https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-02-01/nrg-s-massive-california-solar-plant-finally-making-enough-power.

45. "Spain's Abengoa Says Has Consents to Draw Down on Cash Injection," *Reuters*, February 28, 2017, http://www.reuters.com/finance/stocks/ABG.MC/key-developments/article/3537978.

46. "Concentrating Solar Power Market by Technology, Components, End-User, and Region—Global Forecast to 2021," Research and Markets, February 2017, http://www.researchandmarkets.com/research/52hhdp/concentrating.

47. Thomas Overton, "Crescent Dunes: 24 Hours on the Sun," *POWER Magazine*, October 13, 2016, http://www.powermag.com/crescent-dunes-24-hours-on-the-sun/?pagenum=1.

48. Robert Pietzcker, Daniel Stetter, Daniel Manger, and Gunnar Luderer, "Using the Sun to Decarbonize the Power Sector: The Economic Potential of Photovoltaics and Concentrating Solar Power," *Applied Energy* 135 (2014): 704–720, doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.011.

49. Richard Schmalensee et al., *The Future of Solar Energy*, Working Paper, MIT Energy Initiative, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf.

50. Ming Liu et al., "Review on Concentrating Solar Power Plants and New Dvelopments in High-Temperature Thermal Energy Storage Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016): 1411–1432, doi:10.1016/j.rser.2015.09.026.

51. Joshua Christian and Clifford Ho, "Design Requirements, Challenges, and Solutions for High-Temperature Falling Particle Receivers," In *AIP Conference Proceedings* 1734, no. 1, May 2016, doi:10.1063/1.4949060.

52. Mark Mehos, Craig Turchi, and Jennie Jorgenson, "Advancing Concentrating Solar Power Technology, Performance, and Dispatchability," National Renewable Energy Laboratory (NREL), May 2016, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65688.pdf.

53. Manuel Blanco, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology* (Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 2016).

54. J. W. Schwede, T. Sarmiento, and V. K. Narasimhan, "Photon-Enhanced Thermionic Emission from Heterostructures with Low Interface Recombination," *Nature Communications* 4 (2013): 1576, doi: 10.1038/ncomms2577.

55. Gregory F. Nemet, Martina Kraus, and Vera Zipperer, "The Valley of Death, the Technology Pork Barrel, and Public Support for Large Demonstration Projects," *DIW Berlin*, 2016, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.540709.de/dp1601.pdf

Chapter 8

1. Schumpeter, "Sonic Boom," *The Economist*, April 1, 2017, http://www.economist.com/news/business/21719842-risk-one-japans-greatest-tech-tycoons-his-messianic-streak-masayoshi-son-goes?frsc=dg%7Cd.

2. Leo Lewis, Kana Inagaki, and Simon Mundy, "SoftBank: Waiting for the Next 'Big Idea,'" *Financial Times*, July 13, 2016, https://www.ft.com/content/213582f2-453e-11e6-9b66-0712b3873ae1.

3. John Boyd, "Trio of Nations Aims to Hook Asia Super Grid to Grids of the World," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, September 13, 2016, http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/the-smarter-grid/trio-of-nations-aim-to-hook-asia-super-grid-to-grids-of-the-world.

4. John Fialka, "Clean Line, GE to Build $2.5B Wind Power Line," *E&E Climatewire*, November 2, 2016, https://www.eenews.net/climatewire/2016/11/02/stories/1060045154.

5. "Electricity Now Flows Across Continents, Courtesy of Direct Current," *The Economist*, January 14, 2017, http://www.economist.com/news/science-and-technology/21714325-transmitting-power-over-thousands-kilometres-requires-new-electricity.

6. Zhenya Liu, *Global Energy Interconnection* (San Diego: Elsevier Science Publishing, 2015).

7. John Fialka, "Renewable Energy: China's Breakneck Rise from Solar Dabbler to Dominator," *Environment & Energy Publishing*, December 19, 2016, http://www.eenews.net/climatewire/stories/1060047373/print.

8. John Fialka, "China has a 'Grand Vision for the Grid. Does Trump?" *Climate Wire*, December 21, 2016, https://www.eenews.net/climatewire/stories/1060047497.

9. Arthur Neslen, "Wind Power Generates 140% of Denmark's Electricity Demand," *The Guardian*, July 10, 2015, https://www.theguardian.com/environment/2015/jul/10/denmark-wind-windfarm-power-exceed-electricity-demand.

10. Alex Trembath, "A Look at Wind and Solar, Part 1: How Far We've Come," Breakthrough Institute, https://thebreakthrough.org/index.php/voices/energetics/wind-and-solar-how-far-weve-come.

11. International Energy Agency (IEA), "The Power of Transformation," 2014, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/The_power_of_Transformation.pdf.

12. International Energy Agency (IEA), "Large-Scale Electricity Interconnection," 2016, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Interconnection.pdf.

13. O. Peake, "The History of High-Voltage Direct Current Transmission," Institution of Engineers Australia, 2010, http://ieeemilestones.ethw.org/images/d/d9/Ref3_Peake_2010_Australian_Journal_of_Multi-Disciplinary_Engineering.pdf.

14. Res. No. 013–187, *Adoption by Ordinance to Establish Design-Build Criteria of the Sylmar Filters Replacement Project*, Department of Water and Power of the City of Los Angeles, March 20, 2013, http://clkrep.lacity.org/onlinedocs/2013/13-0338_rpt_bwp_3-20-13.pdf.

15. John Shen, Gourab Sabui, Zhenyu Miao, and Zhikang Shuai, "Wide-Bandgap Solid-State Circuit Breakers for DC Power Systems: Device and Circuit Considerations," *IEEE Transactions on Electron Devices* 62, no. 2 (2015): 294–300, doi:10.1109/ted.2014.2384204.

16. Clark Gellings, "Let's Build a Global Power Grid," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, July 28, 2015, http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/lets-build-a-global-power-grid.

17. International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2014," 2014, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014.pdf.

18. "Opinion Is Divided on China's Massive Infrastructure Projects," *The Economist*, January 12, 2017, http://www.economist.com/news/china/21714381-some-critics-may-be-wrong-opinion-divided-chinas-massive-infrastructure-projects.

19. Ying Li, Zofia Lukszo, and Margot Weijnen, "The Impact of Inter-Regional Transmission Grid Expansion on China's Power Sector Decarbonization," *Applied Energy* 183 (2016): 853–873, doi:10.1016/j.apenergy.2016.09.006.

20. Dmitrii Bogdanov and Christian Breyer, "North-East Asian Super Grid for 100% Renewable Energy Supply: Optimal Mix of Energy Technologies for Electricity, Gas, and Heat Supply Options," *Energy Conversion and Management* 112 (2016): 176–190, doi:10.1016/j.enconman.2016.01.019.

21. Ashish Gulagi, Dmitrii Bogdanov, Mahdi Fasihi, and Christian Breyer, "Can Australia Power the Energy-Hungry Asia with Renewable Energy?" *Sustainability* 9, no. 2 (2017): 233, doi:10.3390/su9020233.

22. Richard Martin, "Morocco's Massive Desert Solar Project Starts Up," *MIT Technology Review*, February 8, 2016, https://www.technologyreview.com/s/600751/moroccos-massive-desert-solar-project-starts-up.

23. Fraunhofer ISE, "Integration of Renewable Energy in Europe and Africa—Study on Supergrid Presents Scenarios and Technologies for a Renewable-Based Energy Supply," Fraunhofer-Gesellschaf news release, April 18, 2016, https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2016/integration-von-erneuerbaren-energien-in-europa-und-afrika.html. .

24. Alexander E. Macdonald et al., "Future Cost-Competitive Electricity Systems and Their Impact on US CO_2 Emissions," *Nature Climate Change* 6 (2016): 52-531, www.nature.com/nclimate/journal/v6/n5/full/nclimate2921.html.

25. International Energy Agency (IEA), "Canada: Electricity and Heat for 2014," 2014, https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CANADA=&product=electricityandheat.

26. Alejandro Chanona Robles, "Tracking the Progress of Mexico's Power Sector Reform," Wilson Center, April 2016, https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/tracking_progress_of_mexicos_power_sector_reform.pdf.

27. The White House, "Leaders' Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership," press release, June 29, 2016, https://

obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/06/29/leaders-statement-north-american-climate-clean-energy-and-environment.

28. New York City, "Chapter 6: Utilities," *A Stronger, More Resilient New York*, http://www.nyc.gov/html/sirr/downloads/pdf/final_report/Ch_6_Utilities_FINAL_singles.pdf.

29. Ning Lin, Kerry Emanuel, Michael Oppenheimer, and Erik Vanmarcke, "Physically Based Assessment of Hurricane Surge Threat Under Climate Change," *Nature Climate Change* 2, no. 6 (2012): 462–467, doi:10.1038/nclimate1389.

30. M. Finster, J. Philips, and K. Wallace, *Front-Resilience Perspectives: The Electrical Grid*, (Lemont, IL: U.S. Department of Energy (DOE), Argonne National Laboratory, 2016).

31. Peter Behr and Saqib Rahim, "Utilities: ConEd taps N.Y. Customers for 'Virtual' Power Plant Project," *E&E News Energy Wire*, http://www.eenews.net/energywire/stories/1060038694.

32. Gavin Bade, "ConEd Awards 22 MW of Demand Response Contracts in Brooklyn-Queens Project," *Utility Dive*, August 8, 2016, http://www.utilitydive.com/news/coned-awards-22-mw-of-demand-response-contracts-in-brooklyn-queens-project/424034.

33. New York State Public Utility Commission, "Order Adopting a Ratemaking and Utility Revenue Model Policy Framework," CASE 14-M-0101, May 19, 2016, http://documents.dps.ny.gov/public/Common/ViewDoc.aspx?DocRefId=%7BD6EC8F0B-6141-4A82-A857-B79CF0A71BF0%7D.

34. George Constable and Bob Somerville, *A Century of Innovation: Twenty Engineering Achievements That Transformed Our Lives* (Washington, DC: Joseph Henry Press, 2003).

35. California Public Utilities Commission, *California's Distributed Energy Resources Action Plan: Aligning Vision and Action*, September 29, 2016, http://www.cpuc.ca.gov/uploadedFiles/CPUC_Public_Website/Content/About_Us/Organization/Commissioners/Michael_J._Picker/2016-09-26%20DER%20Action%20Plan%20FINAL3.pdf.

36. Benjamin Mandel, "The Merits of an 'Integrated' Approach to Performance-Based Regulation," *Electricity Journal* 28, no. 4 (2015): 8–17, doi:10.1016/j.tej.2015.04.004.

37. Enrique Santacana, Gary Rackliffe, Le Tang, and Xiaoming Feng, "Getting Smart," *IEEE Power and Energy Magazine* 8, no. 2 (2010): 41–48, doi:10.1109/mpe.2009.935557.

38. Ryan Hanley, "A Pathway to the Distributed Grid," SolarCity White Paper, February 2016, http://www.solarcity.com/sites/default/files/SolarCity_Distributed_Grid-021016.pdf.

39. S. Abdi and K. Afshar, "Application of IPSO-Monte Carlo for Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 44, no. 1 (2013): 786–797.

40. Stephen Lacey, "Microsoft Says 'Computational Demand Response' Could Lower Data Center Emissions 99%," *Greentech Media*, June 27, 2013, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Microsoft-Says-Computational-Demand-Response-Could-Lower-Data-Center-Emis.

41. Hao Wang, Jianwei Huang, Xiaojun Lin, and Hamed Mohsenian-Rad, "Proactive Demand Response for Data Centers: A Win-Win Solution," *IEEE Transactions on Smart Grid* 7, no. 3 (2016): 1584–1596, doi:10.1109/tsg.2015.2501808.

42. Jamshid Aghaei and Mohammad-Iman Alizadeh, "Demand Response in Smart Electricity Grids Equipped with Renewable Energy Sources: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18 (2013): 64–72, doi:10.1016/j.rser.2012.09.019.

43. Farshid Shariatzadeh, Paras Mandal, and Anurag Srivastava, "Demand Response for Sustainable Energy Systems: A Review, Application, and Implementation Strategy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015): 343–350, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.062.

44. A. Bumpus and S. Comello,"Emerging Clean Energy Technology Investment Trends," *Nature Climate Change* 7 (2017), doi: 10.1038/nclimate3306.

45. Federal Trade Commission (FTC), *Internet of Things: Privacy & Security in a Connected World* (Washington, DC, November 2013, https://www.ftc.gov/system/files/documents/reports/federal-trade-commission-staff-report-november-2013-workshop-entitled-internet-things-privacy/150127iotrpt.pdf).

46. Jeff St. John, "US Smart Meter Deployments to Hit 70M in 2016, 90M in 2020," *Greentech Media*, October 26, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/US-Smart-Meter-Deployments-to-Hit-70M-in-2016-90M-in-2020.

47. Aghaei and Alizadeh, "Demand Response in Smart Electricity Grids Equipped with Renewable Energy Sources: A Review."

48. Christopher Findlay, "Strength in Numbers: Merging Small Generators as Virtual Power Plants," *Living Energy* 4 (2011), http://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/energy-topics/publications/living-energy/pdf/issue-04/Living-Energy-4-Virtual-Power-Plants.pdf.

49. Matt Coleman, "'World's Largest Virtual Power Plant' Switched on in Adelaide," *ABC News*, March 15, 2017, http://www.abc.net.au/news/2017-03-16/virtual-power-plant/8358894.

50. Conor Kelly, John Ging, Aman Kansal, and Michael Walsh, "Balancing Power Systems with Datacenters Using a Virtual Interconnector," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal* 3, no. 2 (2016): 51–59, doi:10.1109/jpets.2016.2519611.

51. Massoud Amin, "Power of Microgrids," *IEEE Smart Grid* (2016): 48–53, http://smartgrid.ieee.org/images/files/pdf/power_of_microgrids.pdf.

52. Dushan Boroyevich, Igor Cvetkovic, Rolando Burgos, and Dong Dong, "Intergrid: A Future Electronic Energy Network?" *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 1, no. 3 (2013): 127–138, doi:10.1109/jestpe.2013.2276937.

53. Robert Hebner, "The Power Grid in 2030," *IEEE Spectrum*, April 2017, doi: 10.1109/MSPEC.2017.7880459.

54. Brian Patterson, *The ENERNET*, Emerge Alliance, October 26–27, 2015, http://www.emergealliance.org/portals/0/documents/events/lvdc/IEC_LVDC_India_2015_Enernet-_FINAL[1].pdf.

55. Hassan Farhangi, "The Path of the Smart Grid," *IEEE Power and Energy* Magazine 8, no. 1 (2010): 18–28, doi:10.1109/mpe.2009.934876.

Chapter 9

1. "Tesla Bid for SolarCity 'Shameful,'" *BBC News*, June 22, 2016, http://www.bbc.com/news/business-36602509.

2. Robert Ferris, "Too Early for Tesla to Merge with Solarcity? Elon Musk Says Deal 'May Even Be a Little Late,'" *CNBC*, November 4, 2016, http://www.cnbc.com/2016/11/04/tesla-solarcity-merger-may-even-be-a-little-late.html.

3. Elon Musk, "The Secret Tesla Motors Master Plan (Just between You and Me)," Tesla, Inc., June 28, 2012, https://www.tesla.com/blog/secret-tesla-motors-master-plan-just-between-you-and-me.

4. Timothy Lee, "The Secrets to Elon Musk's Success," *Vox*, April 10, 2017, http://www.vox.com/new-money/2017/4/10/15211542/elon-musk-success-secret.

5. Thomas Heath, "Tesla's 'Crazy' Climb to America's Most Valuable Car Company," *The Washington Post*, April 10, 2017, https://www.washingtonpost.com/business/economy/teslas-crazy-climb-to-americas-most-valuable-car-company/2017/04/10/de05b9ae-1dfd-11e7-be2a-3a1fb24d4671_story.html.

6. Peter Fairley, "2017 Is the Make-or-Break Year for Tesla's Gigafactory," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, December 30, 2016, http://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/2017-is-the-makeorbreak-year-for-teslas-gigafactory.

7. Jesse D. Jenkins and Samuel Thernstrom, "Deep Decarbonization of the Electric Power Sector: Insights from Recent Literature," Energy Innovation Reform Project (EIRP), March 2017, http://innovationreform.org/wp-content/uploads/2017/03/EIRP-Deep-Decarb-Lit-Review-Jenkins-Thernstrom-March-2017.pdf.

8. International Renewable Energy Agency (IRENA), *Energy Storage Technology Brief* (Abu Dhabi: IRENA, 2012), https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E18%20Electricity-Storage.pdf.

9. Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, and Jonathan Clarke, "Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation," *Applied Energy* 137 (2015): 511–536, doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.081.

10. Jürgen Janek and Wolfgang Zeier, "A Solid Future for Battery Development," *Nature Energy* 1, no. 9 (2016): 16141, doi:10.1038/nenergy.2016.141.

11. "New Energy Outlook 2017," *Bloomberg New Energy Finance*, 2017, https://about.bnef.com/new-energy-outlook.

12. Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, and Jonathan Clarke, "Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation," *Applied Energy* 137 (2015): 511–536, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.

13. "This Is Where Your Smartphone Battery Begins," *Washington Post*, September 30, 2016, https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/.

14. Kaixiang Lin et al., "Alkaline Quinone Flow Battery," *Science* 349, no. 6255 (2015): 1529–1532, doi: 10.1126/science.aab3033.

15. Eric Wesoff, "Ambri Returns to the Energy Storage Hunt with Liquid Metal Battery Redesign," *Greentech Media*, December 15, 2016, https://www.greentechmedia.com/articles/read/Ambri-Returns-to-The-Energy-Storage-Hunt-With-Liquid-Metal-Battery-Redesign.

16. Varun Sivaram, "Ensuring Tesla Doesn't Crowd out the Batteries of the Future," *Forbes*, April 30, 2015, https://www.forbes.com/sites/thelabbench/2015/04/30/ensuring-tesla-doesnt-crowd-out-the-batteries-of-the-future/#43936cde4543.

17. Stephen Brick and Samuel Thernstrom, "Renewables and Decarbonization: Studies of California, Wisconsin and Germany," *The Electricity Journal* 29, no. 3 (2016): 6–12, doi: 10.1016/j.tej.2016.03.001.

18. Mathew Aneke and Meihong Wang, "Energy Storage Technologies and Real Life Applications – A State of the Art Review," *Applied Energy* 179 (2016): 350–377, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097.

19. Mark Jacobson, Mark Delucchi, Mary Cameron, and Bethany Frew, "Low-Cost Solution to the Grid Reliability Problem with 100% Penetration of Intermittent Wind, Water, and Solar for All Purposes," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 49 (2015): 15060–5065, doi: 10.1073/pnas.1510028112.

20. Varun Sivaram, "A Clean Energy Transition Needs More Technology Options," *The Aspen Institute*, June 19, 2017, https://www.aspeninstitute.org/blog-posts/clean-energy-transition-needs-technology-options/.

21. Christopher T. M. Clack et al., "Evaluation of a Proposal for Reliable Low-Cost Grid Power with 100% Wind, Water, and Solar," *PNAS* 114, no. 26 (2017): 6722-6727, doi: 10.1073/pnas.1610381114.

22. Eduardo Porter, "Fisticuffs Over the Route to a Clean-Energy Future," *New York Times*, June 20, 2017, https://www.nytimes.com/2017/06/20/business/energy-environment/renewable-energy-national-academy-matt-jacobson.html; Nathanael Johnson, "A Battle Royale has Broken Out between Clean Power Purists and Pragmatists," June 20, 2017, http://grist.org/briefly/a-battle-royale-has-broken-out-between-clean-power-purists-and-pragmatists/; Chris Mooney, "A Bitter Scientific Debate just Erupted over the Future of America's Power Grid," *The Washington Post*, June 19, 2017, https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2017/06/19/a-bitter-scientific-debate-just-erupted-over-the-future-of-the-u-s-electric-grid/?utm_term=.57ade3099d20; John Wenz and Jason Koebler, "The Clean Energy Debate is Fueling One of the Most Vitriolic Fights in Science Publishing," *Motherboard*, June 19, 2017, https://motherboard.vice.com/en_us/article/8x973b/the-clean-energy-debate-is-fueling-one-of-the-most-vitriolic-fights-in-science-publishing.

23. Volker Krey, Gunnar Luderer, Leon Clarke, and Elmar Kriegler, "Getting from Here to There – Energy Technology Transformation Pathways in the EMF27 Scenarios," *Climatic Change* 123, no. 3-4 (2014): 369–382, doi: 10.1007/s10584-013-0947-5.

24. Elmar Kriegler et al., "The Role of Technology for Achieving Climate Policy Objectives: Overview of the EMF 27 Study on Global Technology and Climate Policy Strategies," *Climatic Change* 123, no. 3-4 (2014): 353–367, doi: 10.1007/s10584-013-0953-7.

25. G. M. Morrison et al., "Comparison of Low-Carbon Pathways for California," *Climatic Change* 131, vol. 4 (2015): 545–557, doi: 10.1007/s10584-015-1403-5.

26. U.S. Energy Information Administration (EIA), "U.S. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions in 2015 Are 12% Below Their 2005 Levels—Today in Energy," May 9, 2016, https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26152.

27. Jesse D. Jenkins and Samuel Thernstrom, "Deep Decarbonization of The Electric Power Sector: Insights from Recent Literature," Energy Innovation Reform Project (EIRP), March 2017, http://innovationreform.org/wp-content/uploads/2017/03/EIRP-Deep-Decarb-Lit-Review-Jenkins-Thernstrom-March-2017.pdf.

28. James H. Williams et al., *Pathways to Deep Decarbonization in the United States* (San Francisco: Energy and Environmental Economics, Inc., 2016), https://usddpp.org/downloads/2014-technical-report.pdf.

29. Gang He et al., "SWITCH-China: A Systems Approach to Decarbonizing China's Power System," *Environmental Science & Technology* 50, no. 11 (2016): 5467–5473, doi:10.1021/acs.est.6b01345.

30. M. M. Hand et al. *National Renewable Energy Laboratory. Renewable Electricity Futures Study (RE Study)*, National Renewable Energy Laboratory, 2012, http://www.nrel.gov/analysis/re_futures.

31. Brendan Pierpoint et al. "Flexibility the Path to Low-Carbon, Low-Cost Electricity Grids," Climate Policy Initiative, 2017, https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2017/04/CPI-Flexibility-the-path-to-low-carbon-low-cost-grids-April-2017.pdf.

32. O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, and I. Staffell, "The Future Cost of Electrical Energy Storage Based on Experience Rates," *Nature Energy* 2 (2017), doi: 10.1038/nenergy.2017.110.

33. Arnulf Grubler, "The Costs of the French Nuclear Scale-Up: A Case of Negative Learning by Doing," *Energy Policy* 38, no. 9 (2010): 5174–5188, doi:10.1016/j.enpol.2010.05.003.

34. Ted Nordhaus, Jessica Lovering, and Michael Shellenberger, "How To Make Nuclear Cheap," The Breakthrough Institute, June 2014, https://thebreakthrough.org/images/pdfs/Breakthrough_Institute_How_to_Make_Nuclear_Cheap.pdf

35. Brad Plumer, "How Carbon Capture Could Become a Rare Bright Spot on Climate Policy in the Trump Era," *Vox*, April 12, 2017, http://www.vox.com/energy-and-environment/2017/4/12/15269628/carbon-capture-trump.

36. Paul Denholm and Robert Margolis, "Energy Storage Requirements for Achieving 50% Solar Photovoltaic Energy Penetration in California," National Renewable Laboratory (NREL), 2016, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66595.pdf.

37. Ana Mileva, Josiah Johnston, James Nelson, and Daniel Kammen, "Power System Balancing for Deep Decarbonization of the Electricity Sector," *Applied Energy* 162 (2016): 1001–1009, doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.180.

38. Whitney Herndon and John Larson, "Nukes in the Crosshairs Revisited: The Market and Emissions Impacts of Retirements," Rhodium Group, November 4, 2016, http://rhg.com/notes/nukes-in-the-crosshairs-revisited.

39. Patrick McGeehan, "New York State Aiding Nuclear Plants With Millions in Subsidies," *The New York Times*, August 1, 2016, https://www.nytimes.com/2016/08/02/nyregion/new-york-state-aiding-nuclear-plants-with-millions-in-subsidies.html.

40. Paul Joskow, "Capacity Payments in Imperfect Electricity Markets: Need and Design," *Utilities Policy* 16, no. 3 (2008): 159–170, doi:10.1016/j.jup.2007.10.003.

41. David Buchan and Malcolm Keay, "EU Energy Policy—4th Time Lucky?" Oxford Institute for Energy Studies, December 2016, https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/12/EU-energy-policy-4th-time-lucky.pdf.

42. C. K. Woo et al., "Merit-Order Effects of Renewable Energy and Price Divergence in California's Day-Ahead and Real-Time Electricity Markets," *Energy Policy* 92 (2016): 299–312, doi:10.1016/j.enpol.2016.02.023.

43. Andre Gensler et al., "Deep Learning for Solar Power Forecasting—An Approach Using AutoEncoder and LSTM Neural Networks," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2016, http://ieeexplore.ieee.org/document/7844673/.

44. E. Ela et al., "Wholesale Electricity Market Design with Increasing Levels of Renewable Generation: Incentivizing Flexibility in System Operations," *The Electricity Journal* 29, no. 4 (2016): 51–60, doi:10.1016/j.tej.2016.05.001.

45. Jenny Riesz and Michael Milligan, "Designing Electricity Markets for a High Penetration of Variable Renewables," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 4, no. 3 (2014): 279–289, doi:10.1002/wene.137.

46. Michael Milligan et al., "Alternatives No More," *IEEE Power and Energy Magazine*, November/December 2015, 78-87, doi: 10.1109/MPE.2015.2462311.

47. M. Gottstein and S. A. Skillings, "Beyond Capacity Markets—Delivering Capability Resources to Europe's Decarbonised Power System," 9th International Conference on the European Energy Market, 2012, doi:10.1109/eem.2012.6254783.

48. "Using Renewables to Operate a Low-Carbon Grid," California Independent System Operator, 2017, http://www.caiso.com/Documents/UsingRenewablesToOperateLowCarbonGrid-FAQ.pdf.

49. Brian Penner, "Grid-Friendly Utility-Scale PV Plants," First Solar, 2013, https://www.caiso.com/Documents/FirstSolarPresentation_ReactivePowerRequirements_FinancialCompensation_WorkingGroup.pdf.

50. Malcolm Keay, "Electricity Markets Are Broken—Can They Be Fixed?" Oxford Institute for Energy Studies, December 2016, https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/02/Electricity-markets-are-broken-can-they-be-fixed-EL-17.pdf.

51. Michael Liebreich, "Six Design Principles for the Power Markets of the Future," *Bloomberg New Energy Finance*, 2017, https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/05/Liebreich-Six-Design-Principles-for-the-Power-Markets-of-the-Future.pdf.

52. Kevin Bullis, "Utilities Say Electric Cars Could Strain the Grid," *MIT Technology Review*, August 16, 2013, https://www.technologyreview.com/s/518066/could-electric-cars-threaten-the-grid/.

53. Jennifer MacDonald, "Electric Vehicles to Be 35% of Global New Car Sales by 2040," *Bloomberg New Energy Finance*, February 25, 2016, at https://about.bnef.com/blog/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/.

54. Kang Miao Tan, Vigna Ramachandaramurthy, and Jia Yang Yong, "Integration of Electric Vehicles in Smart Grid: A Review on Vehicle to Grid Technologies and Optimization Techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016): 720–732, doi:10.1016/j.rser.2015.09.012.

55. International Energy Agency (IEA), "Linking Heat and Electricity Systems," 2014, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/LinkingHeatandElectricitySystems.pdf.

56. Alessandro Pensini, Claus Rasmussen, and Willett Kempton, "Economic Analysis of Using Excess Renewable Electricity to Displace Heating Fuels," *Applied Energy* 131 (2014): 530–543, doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.111.

57. "Smart Energy Systems for Coherent 100% Renewable Energy and Transport Solutions," *Applied Energy* 145 (May 2015): 139-154, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.075.

58. White House, "United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization," 2016, https://unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/us_mid_century_strategy.pdf.

59. Glada Lahn, Paul Stevens, and Felix Preston, "Saving Oil and Gas in the Gulf," Chatham House, August 2013, https://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy%2C%20Environment%20and%20Development/0813r_gulfoilandgas.pdf.

60. John H. Lienhard, Gregory P. Thie, David M.Warsinger, and Leonardo D. Banchik, *Low Carbon Desalination*, Report, Abdul Latif Jameel World Water and Food Security Lab, Massachusetts Institute of Technology, https://jwafs.mit.edu/sites/default/files/images/Report%20v6-final.2016nov28%20with%20citations%20formatted%20Exec.pdf.

61. Mai Mahmoud, "Water at the Nexus of Gulf Security and Growth Challenges," The Arab Gulf States Institute in Washington, 2016, http://www.agsiw.org/wp-content/uploads/2016/10/Mahmoud_Water_ONLINE-1.pdf.

62. Veera Gnaneswar Gude, "Energy Storage for Desalination Processes Powered by Renewable Energy and Waste Heat Sources," *Applied Energy* 137 (2015): 877–898, doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.061.

63. Rabia Ferroukhi et al., "Renewable Energy in the Water, Energy and Food Nexus," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2015, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Water_Energy_Food_Nexus_2015.pdf.

64. Varun Sivaram, "India: The Global Warming Wild Card," *Scientific American* 316, May 2017, 48–53, doi: 10.1038/scientificamerican0517-48.

Chapter 10

1. Clifton Yin, "Arun Majumdar Made ARPA-E an Energy Innovation Leader," *The Innovation Files*, May 14, 2012, http://www.innovationfiles.org/arun-majumdar-made-arpa-e-an-energy-innovation-leader.

2. Executive Office of the President, Office of Management and Budget, "America First: A Budget Blueprint to Make America Great Again," 2017, https://www.govinfo.gov/content/pkg/BUDGET-2018-BLUEPRINT/pdf/BUDGET-2018-BLUEPRINT.pdf.

3. U.S. Congress, Senate, Committee on Appropriations, *Energy and Water Development Appropriations (to Accompany S. 1609)*, 115th Cong., 1st sess., 2017, S. Rep. 115-132, 91, https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/FY2018%20Energy%20and%20Water%20Development%20Appropriations%20Act%20-%20Report%20115-1321.pdf.

4. Bloomberg New Energy Finance (BNEF), "New Energy Outlook 2016," https://www.bloomberg.com/company/new-energy-outlook.

5. Vannevar Bush, "Science, the Endless Frontier," Report, U.S. Government Printing Office, 1945, https://www.nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm#ch2.4.

6. Ibid.

7. Daniel Sarewitz, "Saving Science," *The New Atlantis* 49 (Spring/Summer 2016): 4–40.

8. J. J. Dooley, *U.S. Federal Investments in Energy R&D: 1961–2008*, PNNL-17952, U. S. Department of Energy (DOE), Office of Scientific and Technical Information, 2008, https://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-17952.pdf.

9. Daniel M. Kammen and Gregory F. Netmet, "The Incredible Shrinking Energy R&D Budget," *The Access Almanac,* Spring 2007, 38-40, http://www.accessmagazine.org/wp-content/uploads/sites/7/2016/07/Access-30-06-Almanac-R-D-Budget.pdf.

10. Benjamin Gaddy, Varun Sivaram, Timothy Jones, and Libby Wayman, "Venture Capital and Cleantech: The Wrong Model for Energy Innovation," *Energy Policy* 102 (2017): 385–395, doi:10.1016/j.enpol.2016.12.035.

11. Jeff Brady, "After Solyndra Loss, U.S. Energy Loan Program Turning a Profit," *NPR*, November 13, 2014, http://www.npr.org/2014/11/13/363572151/after-solyndra-loss-u-s-energy-loan-program-turning-a-profit.

12. Charlie Wilson and Arnulf Grübler, *Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures* (New York: Cambridge University Press, 2014).

13. William Bonvillian and Charles Weiss, *Technological Innovation in Legacy Sectors* (New York: Oxford University Press, 2015).

14. Arnold Thackray, David Brock, and Rachel Jones, *Moore's Law: The Life of Gordon Moore, Silicon Valley's Quiet Revolutionary* (New York: Basic Books, 2015).

15. Venkatesh Narayanamurti and Toluwalogo Odumosu, *Cycles of Invention and Discovery: Rethinking the Endless Frontier* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2016).

16. Richard Schmalensee et al., "The Future of Solar Energy," working paper, MIT Energy Initiative, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf.

17. Jeffrey Ball, Dan Reicher, Xiaojing Sun, and Caitlin Pollock, *The New Solar System: China's Evolving Solar Industry and Its Implications for Competitive Solar Power in the United States and the World*, Report, Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, March 20, 2017, https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/the-new-solar-system-china-s-evolving-solar-industry.

18. American Energy Innovation Council, "The Power of Innovation," April 2017, http://americanenergyinnovation.org/wp-content/uploads/2017/04/AEIC-The-Power-Of-Innovation.pdf.

19. William Bonvillian, "The New Model Innovation Agencies: An Overview," *Science and Public Policy* 41, no. 4 (2013): 425–437, doi:10.1093/scipol/sct059.

20. Advanced Research Projects Agency—Energy (ARPA-E), "FOCUS Program Overview," https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/focus.

21. A. P. Goldstein and V. Narayanamurti, "Simultaneous Pursuit of Discovery and Invention in the US Department of Energy," Working Draft, 2017, http://annagoldste.in/wp-content/uploads/2015/05/Basic-and-applied-research-at-ARPA-E-20170408.pdf.

22. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *An Assessment of ARPA-E*, (Washington, DC: The National Academies Press, 2017), doi: 10.17226/24778.

23. The White House, Office of the Press Secretary, "Fact Sheet: President's Budget Proposal to Advance Mission Innovation," Obama White House, news release, February 6, 2016.

24. Laura Diaz Anadon et al., "Transforming U.S. Energy Innovation," Report for Energy Technology Innovation Policy research group, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, November 2011, http://www

.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/uploads/energy-report-january-2012.pdf.

25. Laura Diaz Anadon, "Missions-Oriented RD&D Institutions in Energy: A Comparative Analysis of China, the United Kingdom, and the United States," *Research Policy* 41, vol. 10 (2012): 1742–1756, doi: 10.1016/j.respol.2012.02.015.

26. Ali Zaidi and Lynn Orr, "Advancing the Frontiers of Clean Energy Innovation," National Archives and Records Administration, https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2016/10/12/advancing-frontiers-clean-energy-innovation.

27. The White House, Office of the Press Secretary, "Fact Sheet: New Progress in a Resurgent American Manufacturing Sector," Obama White House, news release, October 6, 2016.

28. American Energy Innovation Council, "The Power of Innovation," April 2017, http://americanenergyinnovation.org/wp-content/uploads/2017/04/AEIC-The-Power-Of-Innovation.pdf.

29. Varun Sivaram, Teryn Norris, Colin McCormick, and David M. Hart, "Energy Innovation Policy: Priorities for the Trump Administration and Congress," Information Technology & Innovation Foundation, December 2016, http://www2.itif.org/2016-energy-innovation-policy.pdf.

30. David C. Mowery, "Federal Policy and the Development of Semiconductors, Computer Hardware, and Computer Software: A Policy Model for Climate-Change R&D?" in Rebecca M. Henderson and Richard G. Newell (eds.), *Accelerating Energy Innovation: Insights from Multiple Sectors* (Chicago: University of Chicago Press, 2011): 159–188.

31. John Alic, Daniel Sarewitz, Charles Weiss, and William Bonvillian, "A New Strategy for Energy Innovation," *Nature* 466, vol. 15 (2010): 316–317, http://cspo.org/legacy/library/100715F9KS_lib_SarewitzetalNatu.pdf.

32. H. R. Rep. and S. Rep. No. 115-JCX-3–17, Estimates of Federal Tax Expenditures for Fiscal Years 2016–2020, (2017), https://www.jct.gov/publications.html?func=startdown&id=4971.

33. David G. Victor and Kassia Yanosek, "The Crisis in Clean Energy Stark Realities of the Renewables Craze," *Foreign Affairs* (July/August 2011): 112–120, https://www.foreignaffairs.com/articles/2011-06-16/crisis-clean-energy.

34. Alex Trembath, Ted Nordhaus, Michael Shellenberger, and Jesse Jenkins, "Beyond Boom and Bust: Putting Clean Tech on a Path to Subsidy Independence," *The Breakthrough*, April 17, 2012, http://thebreakthrough.org/archive/beyond_boom_and_bust_report_ov.

35. Nichola Groom, "Prospect of Trump Tariff Casts Pall over U.S. Solar Industry," *Reuters*, July 25, 2017, http://www.reuters.com/article/us-usa-trade-solar-insight-idUSKBN1AA0BI.

36. Enrico Moretti, "Local Multipliers," *The American Economic Review* 100, no. 2 (May 2010): 272–337, http://www.aeaweb.org/articles.php?doi=10.1257/aer.100.2.1

37. Gilbert Metcalf, "The Impact of Removing Tax Preferences for U.S. Oil and Gas Production," Discussion paper, Council on Foreign Relations, August 2016, http://www.cfr.org/energy-policy/impact-removing-tax-preferences-us-oil-gas-production/p38150.

38. Rob Nikolewski, "PG&E Files Plan to Shut Down Diablo Canyon Nuclear Power Plant," *Los Angeles Times*, August 11, 2016, http://www.latimes.com/business/la-fi-nuclear-power-pacific-gas-20160811-snap-story.html.

39. Daniel Shea and Kristy Hartman, "State Options to Keep Nuclear in the Energy Mix," Report, National Conference of State Legislatures, January 2017, http://www.ncsl.org/Portals/1/Documents/energy/StateOptions_NuclearPower_f05_WEB.pdf.

40. Felix Mormann, Dan Reicher, and Victor Hanna, "A Tale of Three Markets: Comparing the Renewable Energy Experiences of California, Texas, and Germany," *Stanford Environmental Law Journal* 45, vol. 1 (2016), 55–99.

41. Dan Reicher, "Setting the Climate Agenda for the Next President Toward a More Effective Federal Clean Energy Toolkit," Discussion paper, In *New U.S. Leadership, Next Steps on Climate Change*, Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, Stanford University Press, 2016, 166-182, http://docplayer.net/49114393-New-u-s-leadership-next-steps-on-climate-change.html.

42. Felix Mormann and Dan Reicher, "Smarter Finance for Cleaner Energy: Open Up Master Limited Partnerships (MLPs) and Real Estate Investment Trusts (REITs) to Renewable Energy Investment," Renewing the Economy series, The Brookings Institution, November 13, 2012, https://www.brookings.edu/research/invest-but-reform-smarter-finance-for-cleaner-energy-open-up-master-limited-partnerships-mlps-and-real-estate-investment-trusts-to-renewable-energy-investment-reits.

43. Joseph Aldy and Robert Stavins, "The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theories and Experience," *Journal of Environment and Development*, Special Issue, October 27, 2011, https://research.hks.harvard.edu/publications/getFile.aspx?Id=734.

44. James A. Baker, III et al., "The Conservative Case for Carbon Dividends," Climate Leadership Council, February 2017, https://www.clcouncil.org/media/TheConservativeCaseforCarbonDividends.pdf.

45. Matt Hourihan and Robert D. Atkinson, "Inducing Innovation: What a Carbon Price Can and Can't Do," Information Technology and Innovation Foundation, March 2011, http://www.itif.org/files/2011-inducing-innovation.pdf.

46. Daron Acemoglu et al., "The Environment and Directed Technical Change," *American Economic Review* 102 (2012): 131-166, https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.102.1.131.

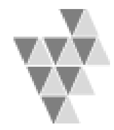
47. Varun Sivaram and Sagatom Saha, "The Trouble with Ceding Climate Leadership to China," *Foreign Affairs*, December 20, 2016, https://www.foreignaffairs.com/articles/united-states/2016-12-20/trouble-ceding-climate-leadership-china.

48. Daniel L. Sanchez and Varun Sivaram, "Saving Innovative Climate and Energy Research: Four Recommendations for Mission Innovation," *Energy Research and Social Science* 29 (2017), doi: 10.1016/j.erss.2017.05.022.

49. Colin McCormick and David Sandalow, *Solar Together: A Proposal*, Report, SIPA Center on Global Energy Policy, Columbia University, 2016, http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/Center%20On%20Global%20Energy%20Policy_Solar%20Together_April%202016.pdf.

50. Jeffrey Ball, Dan Reicher, Xiaojing Sun, and Caitlin Pollock, "The New Solar System: China's Evolving Solar Industry and Its Implications for Competitive Solar Power in the United States and the World," Report, Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, March 20, 2017, https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/the-new-solar-system-china-s-evolving-solar-industry.

51. Nathan Associates, Inc, "Beyond Borders: The Global Semiconductor Value Chain," Semiconductor Industry Association, May 2016, https://www.semiconductors.org/clientuploads/Trade%20and%20IP/SIA%20-%20Beyond%20Borders%20Report%20-%20FINAL%20May%206.pdf.



قائمة مراجع الأشكال

Chapter 1

1.1 Varun Sivaram, Gireesh Shrimali, and Dan Reicher, "Reach for the Sun: How India's Audacious Solar Ambitions Could Make or Break Its Climate Commitments," Stanford Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, December 8, 2015, https://law.stanford.edu/reach-for-the-sun-how-indias-audacious-solar-ambitions-could-make-or-break-its-climate-commitments.

Chapter 2

2.1 National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Best Research-Cell Efficiencies," 2017, http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg.

2.6 Eric Wesoff and Stephen Lacey, "Solar Costs Are Hitting Jaw-Dropping Lows in Every Region of the World," *Greentech Media*, June 27, 2017, https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-costs-are-hitting-jaw-dropping-lows-in-every-region-of-the-world.

2.7 Benjamin Attia, Manan Parikh, and Tom Heggarty, "Global Solar Demand Monitor: Q2 2017," *Greentech Media*, July, 2017, https://www.greentechmedia.com/research/report/global-solar-demand-monitor-q2-2017.

2.8 Bloomberg New Energy Finance (BNEF), "New Energy Outlook 2017," June 2017, https://www.bloomberg.com/company/new-energy-outlook.

Chapter 3

3.1 "Energy Technology Perspectives 2017—Catalysing Energy Technology Transformations," International Energy Agency (IEA), June 6, 2017, http://www.iea.org/etp.

3.2 Figure reprinted with permission from Varun Sivaram and Shayle Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," Nature Energy 1, no. 4 (April 7,

Future of Solar Energy," working paper, MIT Energy Initiative, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf; Lion Hirth, "Market Value of Solar Power: Is Photovoltaics Cost Competitive?" *Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation* 9, no. 1 (2014): 37-45, doi:10.1049/iet-rpg.2014.0101; and Andrew Mill and Ryan Wiser, "Changes in the Economic Value of Variable Generation at High Penetration Levels: A Pilot Case Study of California," Lawrence Berkeley National Lab, 2012, LBNL-5445E, https://emp.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-5445e.pdf.

3.3 Panel (a) adapted from J. P. Hansen, P. A. Narbel, and D. L. Aksnes, "Limits to Growth in the Renewable Energy Sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2016): doi:10.1016/j.rser.2016.11.257; Panel (b) generated from data in BP, "BP Statistical Review of World Energy 2017," June 2017, https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf.

3.5 Figure reprinted with permission from Varun Sivaram and Shayle Kann, "Solar Power Needs a More Ambitious Cost Target," *Nature Energy* 1, no. 4 (April 7, 2016): doi:10.1038/nenergy.2016.36. Data from GTM Research, "PV Cost Database 2016," 2016, https://www.greentechmedia.com/research/publications/category/solar.

Chapter 4

4.2 Varun Sivaram, "Solar's Paradoxical 2015 in Three Charts," *Energy, Security, and Climate Blog,* Council on Foreign Relations, January 14, 2016, https://www.cfr.org/blog/solar-powers-paradoxical-2015-three-charts.

4.4 Ethan Zindler and Ken Locklin, "Mapping the Gap: The Road from Paris," Bloomberg New Energy Finance, January 27, 2016, https://www.ceres.org/resources/reports/mapping-the-gap-the-road-from-paris.

Chapter 5

5.3 Bloomberg New Energy Finance (BNEF), Lighting Global, and Global Off-Grid Lighting Association, "Off-Grid Market Trends Report 2016," February 2016, http://www.energynet.co.uk/webfm_send/1690.

5.4 Figure reprinted from International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2014, November 12, 2014, http://www.worldenergyoutlook.org/weo2014. Figure originally published in Mentis et al., "A GIS-Based Approach for Electrification Planning—A Case Study on Nigeria," *Energy for Sustainable Development*, no. 29

6.2 Varun Sivaram, Samuel Stranks, and Henry J. Snaith, "Perovskite Solar Cells Could Beat the Efficiency of Silicon," *Scientific American*, July 2015, https://www.scientificamerican.com/article/perovskite-solar-cells-could-beat-the-efficiency-of-silicon.

6.3 Steve Albrecht and Bernd Rech, "Perovskite Solar Cells: On Top of Commercial Photovoltaics," *Nature Energy*, no. 2 (2017), https://www.nature.com/articles/nenergy2016196.

6.4 U.S. Department of Energy (DOE) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "The SunShot Initiative's 2030 Goal: 3¢ per Kilowatt Hour for Solar Electricity," December 2016, https://energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/SunShot%202030%20Fact%20Sheet-12_16.pdf.

Chapter 7

7.2 "Solar Fuels and Artificial Photosynthesis: Science and Innovation to Change Our Future Energy Options," Royal Society of Chemistry, June 2012, http://www.rsc.org/globalassets/04-campaigning-outreach/policy/research-policy/global-challenges/solar-fuels-2012.pdf.

7.4 "On the Path to Sunshot," U.S. Department of Energy, 2016, http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65688.pdf.

Chapter 8

8.1 Clark Gellings, "Let's Build a Global Power Grid," *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, July 28, 2015, http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/lets-build-a-global-power-grid.

Chapter 9

9.2 Energy Information Administration (EIA), "Electricity Storage Technologies Can Be Used for Energy Management and Power Quality," December 14, 2011, https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=4310.

9.3 Jesse D. Jenkins and Samuel Thernstrom, "Deep Decarbonization of The Electric Power Sector: Insights From Recent Literature," Energy Innovation Reform Project (EIRP), March 2017, http://innovationreform.org/wp-content/uploads/2017/03/EIRP-Deep-Decarb-Lit-Review-Jenkins-Thernstrom-March

9.4 Jesse Jenkins, Nestor Sepulveda, Patrick Brown, Shayle Kann, and Varun Sivaram, "Effect of Solar and Storage Costs on Economically Optimal Solar PV Penetration," Working Paper, 2018.

Chapter 10

10.1 Mission Innovation, "Baseline and Doubling Plans," http://mission-innovation.net/our-work/baseline-and-doubling-plans.

10.2 Richard Schmalensee et al., "The Future of Solar Energy," MIT Energy Initiative, 2015, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf.

10.3 Benjamin Gaddy, Varun Sivaram, Timothy Jones, and Libby Wayman, "Venture Capital and Cleantech: The Wrong Model for Energy Innovation," *Energy Policy* 102 (2017): 385–395, doi:10.1016/j.enpol.2016.12.035.

